

MATLAB Programming for Finite Element Methods

Terence YUE Yu

MATLAB version: \geq R2015a

目 录

1 网格的图示与标记	1
1.1 网格与解的图示	1
1.1.1 基本数据结构	1
1.1.2 补片函数 patch	2
1.1.3 操作 cell 数组的 cellfun 函数	3
1.1.4 showmesh 函数的建立	4
1.1.5 showsolution 函数的建立	5
1.2 网格的标记	9
1.2.1 节点标记	9
1.2.2 单元标记	10
1.2.3 边的标记	11
2 辅助数据结构与几何量	17
2.1 辅助数据结构	17
2.1.1 elem2edge 的生成	17
2.1.2 edge2elem 的生成	21
2.1.3 neighbor 的生成	23
2.2 网格相关的几何量	24
2.3 auxstructure 与 auxgeometry 函数	25
2.4 边界设置	27
2.4.1 边界边的定向	28
2.4.2 边界的设置	29
3 一维问题的有限元方法	32
3.1 单元与整体的关系	32
3.1.1 整体节点基与局部节点基	32
3.1.2 整体刚度矩阵与单元刚度矩阵的关系	33
3.2 刚度矩阵与载荷向量的装配	35
3.2.1 载荷向量的装配	35
3.2.2 刚度矩阵的装配	36
3.2.3 指标装配法	37

3.2.4	sparse 装配法	39
刚度矩阵的装配	39	
载荷向量的装配	43	
3.3	程序设计	46
3.3.1	问题说明	46
3.3.2	刚度矩阵和载荷向量的装配	47
3.3.3	边界项的处理	48
3.3.4	程序整理	52
函数文件	52	
主程序	53	
4	二维问题的有限元方法	56
4.1	一些说明	56
4.1.1	问题描述与网格数据	56
4.1.2	二维问题的装配	59
指标装配法	59	
sparse 装配法	62	
4.2	Poisson 方程的一阶有限元方法	63
4.2.1	刚度矩阵的计算	63
4.2.2	载荷向量的计算	65
4.2.3	边界条件的处理	67
等效拉平法	67	
4.2.4	边界积分的装配	69
边界单元的积分计算	70	
边界条件的程序实现	71	
4.2.5	程序整理	73
函数文件	73	
主程序	75	
4.2.6	误差分析	76
4.3	Poisson 方程的二阶有限元方法	81
4.3.1	sparse 装配指标	81
4.3.2	刚度矩阵和载荷向量的计算	82
4.3.3	边界条件的处理	84

4.4 Poisson 方程的三阶有限元方法	85
5 线弹性边值问题	87
5.1 线弹性边值问题简介	87
5.1.1 问题说明	87
5.1.2 连续变分问题	88
5.1.3 有限元方法	89
5.2 刚度矩阵与载荷向量的装配	90
5.2.1 单元的向量法分析	90
5.2.2 sparse 装配指标	91
5.2.3 双线性分量的配对	93
5.3 第一种形式的变分问题	95
5.3.1 刚度矩阵的计算	95
5.3.2 载荷向量的计算	97
5.3.3 Neumann 边界条件	99
5.3.4 Dirichlet 边界条件	100
5.3.5 程序整理	100
函数文件	100
主程序	103
5.4 第二种形式的变分问题	105
5.5 第三种形式的变分问题	106
6 Kirchhoff 板弯问题	111
6.1 变分问题	111
6.1.1 平衡方程与边界条件	111
6.1.2 变分问题	112
6.1.3 有限元方法	112
6.2 非协调 Morley 元	113
6.2.1 Morley 元的构造	113
局部节点基	113
整体节点基	115
6.2.2 自由度的方向处理	116
方法一: 边的符号化	116
方法二: 符号刚度矩阵和符号载荷向量	117

6.2.3	sparse 装配指标	118
6.2.4	刚度矩阵与载荷向量的计算	119
	双线性形式第一项的计算	119
	双线性形式第二项的计算	122
	载荷向量的计算	123
6.2.5	边界条件的处理	123
6.2.6	数值结果	124
6.3	非协调 Zienkiewicz 元	125
6.3.1	Zienkiewicz 元的构造	125
6.3.2	sparse 装配指标	126
6.3.3	双线性形式第一项的计算	127
6.3.4	双线性形式第二项的计算	131
6.3.5	边界条件的处理	132
6.4	非协调 Adini 元	133
6.4.1	Adini 元的构造	133
6.4.2	刚度矩阵和载荷向量的计算	134
6.5	双调和方程的混合元方法	136
6.5.1	混合元的变分问题	136
6.5.2	装配指标	137
6.5.3	刚度矩阵的计算	138
7	标量有限元的基于变分形式的有限元程序设计	140
7.1	程序的设计思路	140
7.1.1	变分形式与程序的对应	140
7.1.2	网格信息 Th	142
7.2	int2d 函数	143
7.2.1	变分形式的计算	143
7.2.2	变分形式的程序设计	147
7.3	int1d 函数	152
7.3.1	变分形式的计算	152
7.3.2	变分形式的程序设计	155
7.4	一维问题 Lagrange 有限元程序示例	160
7.4.1	一维问题的一阶 Lagrange 有限元	160

7.4.2	一维问题的高阶 Lagrange 元	163
7.5	二维问题 Lagrange 有限元程序示例	166
7.5.1	二维问题的一阶 Lagrange 有限元	166
程序编写说明	166	
程序整理	170	
主程序	171	
7.5.2	二维问题的高阶 Lagrange 元	175
7.6	线弹性问题的分块编程	179
7.6.1	第三种形式的变分问题	179
程序编写说明	179	
程序整理	180	
主程序	182	
7.6.2	第二种形式的变分问题	183
程序编写说明	183	
程序整理	185	
主程序	187	
8	向量有限元的基于变分形式的程序设计	189
8.1	int2dvec 函数	189
8.1.1	组合型配对的处理	189
8.1.2	双线性形式的计算	192
8.1.3	线性形式的计算	195
8.2	int1dvec 函数	195
8.3	线弹性边值问题	196
8.3.1	函数文件	196
8.3.2	主程序	197
9	自适应有限元方法	199
9.1	自适应方法简介	199
9.1.1	后验误差估计	199
9.1.2	加密或标记准则	200
9.1.3	有限元程序	201
9.2	误差指示子的计算	203
9.2.1	残差的计算	203

9.2.2	边界跳量的计算	204
9.2.3	indicator 函数	207
9.3	标记算法的实现	209
9.4	Newest-node bisection	210
9.4.1	局部加密方式	211
9.4.2	最新点二分的简单说明	213
9.4.3	标记二分的程序实现	215
9.4.4	协调二分的程序实现	218
9.4.5	Newest-node bisection 程序整理	219
9.5	自适应有限元程序	220
10	多重网格法	223
10.1	嵌套有限元	223
10.1.1	嵌套有限元空间与子空间方程	223
10.1.2	延长、限制算子与延长、限制矩阵	224
10.1.3	Galerkin 条件	225
10.2	MG 的基本思想	226
10.2.1	残差校正与频率分量	226
10.2.2	经典迭代法对频率分量的影响	227
10.2.3	两网格方法	229
10.3	MG 的算法描述	231
10.3.1	MG 的两网格添加	231
10.3.2	V-循环的伪代码	233
10.4	MG 矩阵的获得	234
10.4.1	延长矩阵	234
10.4.2	延长矩阵的程序实现	236
10.5	一维问题的 MG 方法	238
10.5.1	刚度矩阵和载荷向量	238
10.5.2	多重网格函数 mgVcycle.m	241
mgVcycle 函数	241	
Vcycle 函数	241	
smoother 函数	243	
10.5.3	数值结果	243

10.6 二维问题的 MG 方法	244
10.6.1 归结为一维问题	244
10.6.2 MG 矩阵的获得	245
10.6.3 数值结果	246
10.6.4 基于变分形式的编程	248
程序编写说明	248
程序整理	249
主程序	251

第一章 网格的图示与标记

1.1 网格与解的图示

1.1.1 基本数据结构

我们采用 Chen Long 有限元工具箱 iFEM 中给出的数据结构, 用 `node` 表示节点坐标, `elem` 表示单元的连通性, 即单元顶点编号. 例如考虑下图中 L 形区域的一个简单剖分 (对一般的多角形剖分类似). 可参考网页说明:

<https://www.math.uci.edu/~chenlong/ifemdoc/mesh/meshbasicdoc.html>

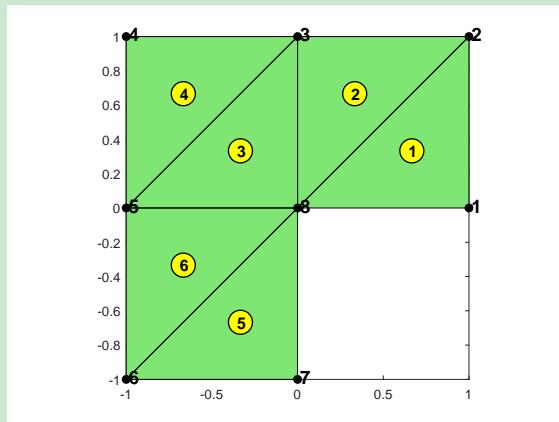


图 1.1. L 形区域的剖分

1. 数组 `node`: 节点坐标

在编程中我们需要每个节点的坐标, 用 `node` 记录, 它是两列的矩阵, 第一列表示各节点的横坐标, 第二列表示各节点的纵坐标, 行的索引对应节点标号. 图中给出的顶点坐标信息如下

	1	2
1	1	0
2	1	1
3	0	1
4	-1	1
5	-1	0
6	-1	-1
7	0	-1
8	0	0

这里左侧的序号对应节点的整体编号.

2. 数组 elem: 连通性 (局部整体对应)

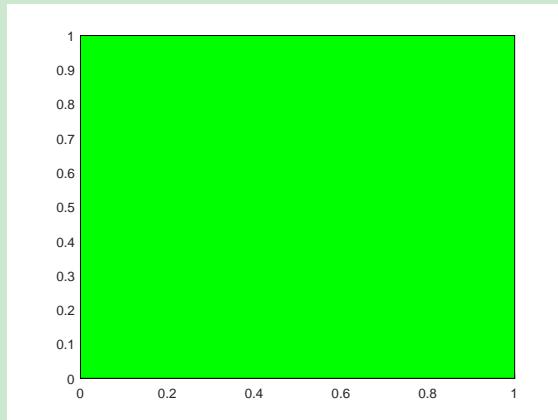
数组 elem 给出每个三角形的顶点编号, 它给出的是单元的连通性信息, 每行对应一个单元.

6x3 double			
	1	2	3
1	1	2	8
2	3	8	2
3	8	3	5
4	4	5	3
5	7	8	6
6	5	6	8

图中第一列表示所有三角形的第一个点的编号, 第二列表示第二个点的编号, 依此类推. 注意三角形顶点的顺序符合逆时针定向. elem 是有限元编程装配过程中的局部整体对应. 对多角形剖分, elem 为元胞数组, 每个元胞存储一个单元.

1.1.2 补片函数 patch

我们要画出每个单元. 对三角形单元, MATLAB 有专门的命令, 对多边形我们需要采用补片函数 patch. 实际上三角剖分采用的也是 patch, 为此本文只考虑 patch. 以下只考虑二维区域剖分的图示, 命名为 showmesh.m. 一个简单的例子如下图



可如下编程

```
node = [0 0; 1 0; 1 1; 0 1];
elem = [1 2 3 4];
patch('Faces', elem, 'Vertices', node, 'FaceColor', 'g')
```

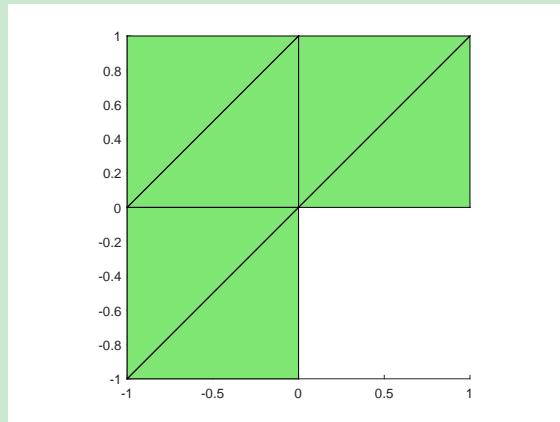
对多个相同类型的单元, 如下

```
1 function showmesh(node, elem)
2 h = patch('Faces', elem, 'Vertices', node);
```

```
3 set(h,'facecolor',[0.5 0.9 0.45],'edgecolor','k');
4 axis equal; axis tight;
```

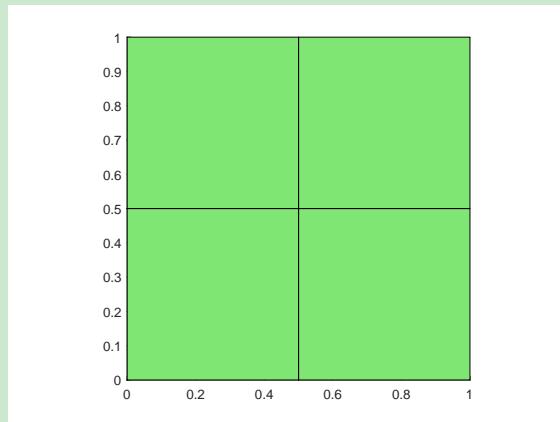
例 1.1 (三角剖分) 对前面的梯形区域, 如下调用 showmesh 函数

```
1 node = [1,0; 1,1; 0,1; -1,1; -1,0; -1,-1; 0,-1; 0,0];
2 elem = [1,2,8; 3,8,2; 8,3,5; 4,5,3; 7,8,6; 5,6,8];
3 showmesh(node,elem);
```



例 1.2 (四边形剖分) 对矩形区域的四边形剖分, 如下调用 showmesh 函数

```
1 [X,Y] = ndgrid(0:0.5:1,0:0.5:1);
2 node = [X(:), Y(:)];
3 elem = [1 2 5 4; 2 3 6 5; 4 5 8 7; 5 6 9 8];
4 showmesh(node,elem)
```



1.1.3 操作 cell 数组的 cellfun 函数

对含有不同多角形剖分的区域, 因每个单元顶点数不同, elem 一般以 cell 数组存储. 为了使用 patch 画图 (避免循环语句逐个), 我们需要将 elem 的每个 cell 填充成相同维数的向

量, 填充的值为 NaN, 它不会起作用. 先介绍 MATLAB 中操作 cell 数组的函数 cellfun. 例如, 考虑下面的例子.

例 1.3 计算 cell 数组中元素的平均值和维数

```

1 C = {1:10, [2; 4; 6], []};
2 averages = cellfun(@mean, C)
3 [nrows, ncols] = cellfun(@size, C)
4
5 % 结果为 averages = 5.5000    4.0000      NaN
6 %      nrows = 1 3 0,      ncols = 10 1 0

```

cellfun 的直接输出规定为数值数组, 如果希望输出的是多种类型的元素, 那么需要指定 UniformOutput 为 false, 例如

例 1.4 对字符进行缩写

```

1 days = {'Monday', 'Tuesday', 'Wednesday', 'Thursday', 'Friday'};
2 abbrev = cellfun(@(x) x(1:3), days, 'UniformOutput', false)

```

正因为此时输出类型可以任意, MATLAB 默认仍保存为 cell 类型. 上面的结果为

```

abbrev =
1×5 cell array
{'Mon'}    {'Tue'}    {'Wed'}    {'Thu'}    {'Fri'}

```

1.1.4 showmesh 函数的建立

现在考虑下图所示的剖分

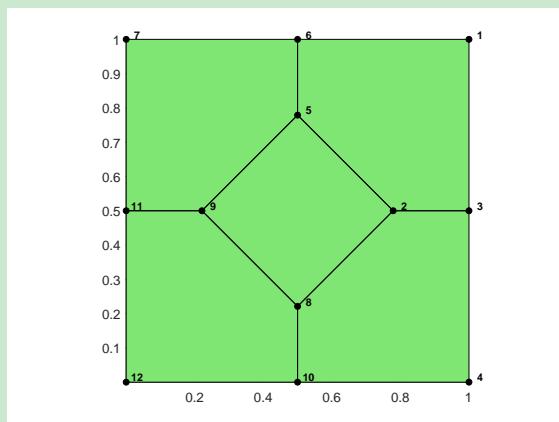


图 1.2. 多角形网格

相关的网格数据保持在 meshex1.mat 中. 程序如下

```
1 load('meshhex1.mat'); % node, elem
2
3 max_n_vertices = max(cellfun(@length, elem));
4 % function to pad the vacancies (横向拼接)
5 padding_func = @(vertex_ind) [vertex_ind, ...
6     NaN(1,max_n_vertices-length(vertex_ind))];
7 tpad = cellfun(padding_func, elem, 'UniformOutput', false);
8 tpad = vertcat(tpad{:});
9 h = patch('Faces', tpad, 'Vertices', node);
10 set(h,'facecolor',[0.5 0.9 0.45], 'edgecolor','k');
11 axis equal; axis tight;
```

最终给出的 showmesh 函数如下

CODE 1.1. showmesh.m (2D 网格画图)

```
1 function showmesh(node,elem)
2 %Showmesh displays a mesh in 2-D.
3
4 if ~iscell(elem)
5     h = patch('Faces', elem, 'Vertices', node);
6
7 else
8     max_n_vertices = max(cellfun(@length, elem));
9     padding_func = @(vertex_ind) [vertex_ind, ...
10         NaN(1,max_n_vertices-length(vertex_ind))]; % function to ...
11         pad the vacancies
12     tpad = cellfun(padding_func, elem, 'UniformOutput', false);
13     tpad = vertcat(tpad{:});
14     h = patch('Faces', tpad, 'Vertices', node);
15
16 set(h,'facecolor',[0.5 0.9 0.45], 'edgecolor','k');
17 axis equal; axis tight;
```

1.1.5 showsolution 函数的建立

showsolution 函数绘制解的网格图, 它的程序如下

```
1 function showsolution(node,elem,u)
```

```

2 %Showsolution displays the solution corresponding to a mesh given ...
3   by [node,elem] in 2-D.
4
5 data = [node,u];
6 patch('Faces', elem, ...
7       'Vertices', data, ...
8       'FaceColor', 'interp', ...
9       'CData', u / max(abs(u)) );
10 axis('square');
11 sh = 0.05;
12 xlim([min(node(:,1))-sh, max(node(:,1))+sh])
13 ylim([min(node(:,2))-sh, max(node(:,2))+sh])
14 xlabel('x'); ylabel('y'); zlabel('u');
15
16 view(3); grid on; % view(150,30);

```

我们来说明一下.

- patch 也可以画空间中的直面, 此时只要把 'Vertices' 处的数据换为三维的顶点坐标.
- 对解 u , 显然 $\text{data} = [\text{node}, u]$ 就是画图的三维点坐标.
- patch 后的

```
'FaceColor', 'interp', 'CData', u / max(abs(u))
```

是三维图形的颜色, 它根据 'CData' 数据进行插值获得 (不对颜色进行设置, 默认为黑色). 也可以改为二维的

```
set(h, 'facecolor', [0.5 0.9 0.45], 'edgecolor', 'k');
```

此时显示的只是一种颜色, 对解通常希望有颜色的变化.

- 需要注意的是, 即便是三维数据, 若不加最后的

```
view(3); grid on; %view(150,30);
```

给出的也是二维图 (投影, 即二维剖分图).

当然上面的程序也可修改一下以适合多角形剖分, 如下

CODE 1.2. showsolution.m

```

1 function showsolution(node,elem,u)
2 %Showsolution displays the solution corresponding to a mesh given ...
3 % by [node,elem] in 2-D.
4
5 data = [node,u];
6 if ~iscell(elem)
7     patch('Faces', elem, ...
8           'Vertices', data, ...
9           'FaceColor', 'interp', ...
10          'CData', u / max(abs(u)) );
11 else
12     max_n_vertices = max(cellfun(@length, elem));
13     padding_func = @(vertex_ind) [vertex_ind, ...
14                                 NaN(1,max_n_vertices-length(vertex_ind))]; % function to ...
15     % pad the vacancies
16     tpad = cellfun(padding_func, elem, 'UniformOutput', false);
17     tpad = vertcat(tpad{:});
18     patch('Faces', tpad, ...
19           'Vertices', data, ...
20           'FaceColor', 'interp', ...
21           'CData', u / max(abs(u)) );
22 end
23 axis('square');
24 sh = 0.05;
25 xlim([min(node(:,1)) - sh, max(node(:,1)) + sh])
26 ylim([min(node(:,2)) - sh, max(node(:,2)) + sh])
27 zlim([min(u) - sh, max(u) + sh])
28 xlabel('x'); ylabel('y'); zlabel('u');

view(3); grid on; % view(150,30);

```

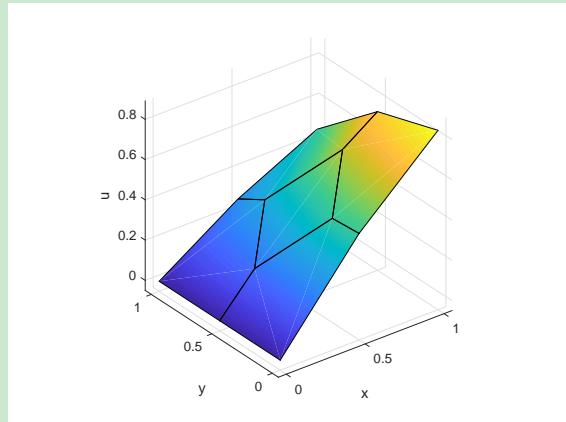
例 1.5 例如, 如下画 $u(x,y) = \sin x \cos y$ 的图像

```

1 load('meshhex1.mat');
2 x = node(:,1); y = node(:,2); u = sin(x).*cos(y);
3 showsolution(node,elem,u);

```

结果如下



注 1.1 showmesh 与 showsolution 唯一不同的地方就是添加

```
view(3); grid on; %view(150,30);
```

三维网格的单元是多面体, 我们一般也是逐个面画图, 此时可在 showmesh 下添加上面的语句. 修改后的 showmesh 如下 (画图时三维的 elem 要存储为面)

CODE 1.3. showmesh.m

```

1 function showmesh(node,elem)
2 %Showmesh displays a mesh in 2-D and 3-D.
3
4 if ~iscell(elem)
5     h = patch('Faces', elem, 'Vertices', node);
6 else
7     max_n_vertices = max(cellfun(@length, elem));
8     padding_func = @(vertex_ind) [vertex_ind, ...
9         NaN(1,max_n_vertices-length(vertex_ind))]; % function to ...
10    pad the vacancies
11    tpad = cellfun(padding_func, elem, 'UniformOutput', false);
12    tpad = vertcat(tpad{:});
13    h = patch('Faces', tpad, 'Vertices', node);
14 end
15 dim = size(node,2);
16 if dim==3
17     view(3); set(h,'FaceAlpha',0.4); % 透明度
18 end
19
20 set(h,'facecolor',[0.5 0.9 0.45], 'edgecolor','k');
21 axis equal; axis tight;

```

显然, 用该函数也可画解的图像

```
1 load('meshhex1.mat');
2 x = node(:,1); y = node(:,2); u = sin(x).*cos(y);
3 % show the solution by using showmesh
4 data = [node,u];
5 showmesh(data,elem);
```

结果一致, 只不过图像的颜色是单一的罢了. 为了方便, 我们单独建立了 showsolution 函数.

1.2 网格的标记

1.2.1 节点标记

可如下给出图 1.2 中的节点编号

```
1 load('meshhex1.mat');
2 showmesh(node,elem);
3 findnode(node);
```

函数文件如下

CODE 1.4. findnode.m

```
1 function findnode(node,range)
2 %Findnode highlights nodes in certain range.
3
4 hold on
5 dotColor = 'k.';
6 if nargin==1
7     range = (1:size(node,1))';
8 end
9 plot(node(range,1),node(range,2),dotColor, 'MarkerSize', 15);
10 shift = [0.015 0.015];
11 text(node(range,1)+shift(1),node(range,2)+shift(2),int2str(range), ...
12      'FontSize',8,'FontWeight','bold'); % show index number
13 hold off
```

注 1.2 当然也可简单改动以适用于三维情形, 这里略, 见 GitHub 上传程序 (tool 文件夹内).

1.2.2 单元标记

现在标记单元. 我们需要给出单元的重心, 从而标记序号 (重心的计算说明略).

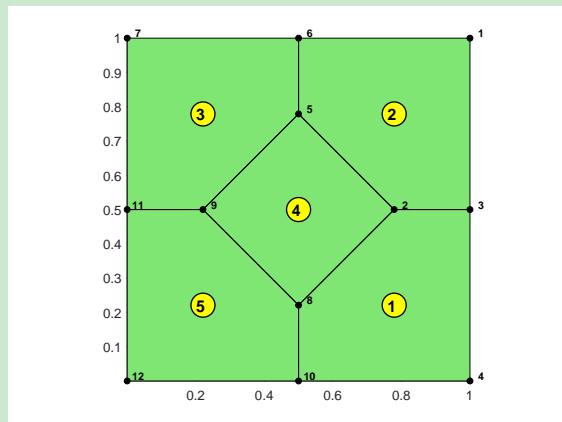


图 1.3. Polygonal mesh

主程序如下

```
1 load('meshhex1.mat');
2 showmesh(node,elem);
3 findnode(node);
4 findelem(node,elem);
```

单元标记函数如下

CODE 1.5. findelem.m

```
1 function findelem(node,elem,range)
2 %Findelem highlights some elements
3
4 hold on
5
6 if nargin==2
7     range = (1:size(elem,1))';
8 end
9
10 center = zeros(length(range),2);
11 s = 1;
12 for iel = range(1):range(end)
13     if iscell(elem)
14         index = elem{iel};
15     else
```

```

16     index = elem(iel,:);
17
18     end
19
20     verts = node(index, :); verts1 = verts([2:end,1],:);
21     area_components = verts(:,1).*verts1(:,2)-verts1(:,1).*verts(:,2);
22     area = 0.5*abs(sum(area_components));
23     center(s,:) = ...
24         sum((verts+verts1).*repmat(area_components,1,2))/(6*area);
25     s = s+1;
26
27 end
28
29
30 hold off

```

注 1.3 这里用圆圈标记单元, 对不同的剖分, 圆圈内的数字不一定在合适的位置, 需要手动调整. 为了方便, 可直接用红色数字标记单元序号.

1.2.3 边的标记

Chen L 在如下网页

<https://www.math.uci.edu/~chenlong/ifemdoc/mesh/auxstructuredoc.html>

中给出了一些辅助网格数据结构 (三角剖分), 其中的 edge 就是记录每条边的顶点编号 (去除重复边). 以下设 NT 表示三角形单元的个数, NE 表示边的个数 (不重复). 我们简单说明一下那里的思路.

- 只要给出每条边两端的节点编号. 内部边在 elem 中会出现两次, 边界边只会出现一次, 我们可用 2 标记内部边, 1 标记边界边.
- 内部边在 elem 中会出现两次, 但它们是同一条边. 为了给定一致的标记, 我们规定每条边起点的顶点编号小于终点的顶点编号, 即 edge(k,1) < edge(k,2).
- 规定三角形的第 i 条边对应第 i 个顶点 (不是必须的, 这个规定有利于网格二分程序的实现), 例如, 设第 1 个三角形顶点顺序为 [1,4,5], 那么边的顺序应是 4-5, 5-1, 1-4. 在 MATLAB 中, 有如下对应

所有单元的第 1 条边: elem(:,[2,3]); % NT * 2

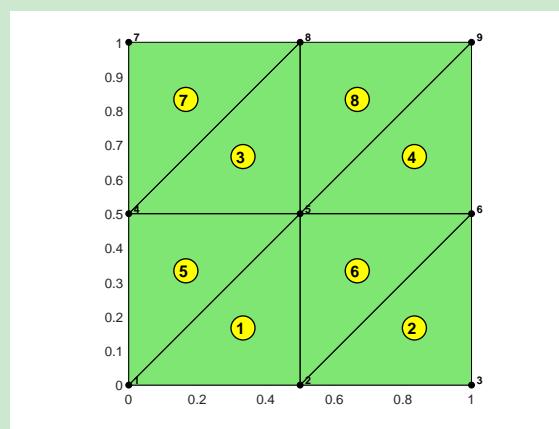
所有单元的第 2 条边: `elem(:, [3,1]); % NT * 2`

所有单元的第 3 条边: `elem(:, [1,2]); % NT * 2`

为了满足 $\text{edge}(k, 1) < \text{edge}(k, 2)$, 可对以上每个矩阵按行进行排列 (每行的两个元素进行比较). 在 MATLAB 中用 `sort(A, 2)` 实现. 把这些边逐行排在一起, 则所有的边 (包含重复) 为

```
totalEdge = sort([elem(:, [2,3]); elem(:, [3,1]); elem(:, [1,2])], 2);
```

它是 $3NT * 2$ 的矩阵. `totalEdge` 见下面的右图.



	1	2
1	1	5
2	2	6
3	4	8
4	5	9
5	1	5
6	2	6
7	4	8
8	5	9
9	1	2
10	2	3
11	4	5
12	5	6
13	4	5
14	5	6
15	7	8
16	8	9
17	2	5
18	3	6
19	5	8
20	6	9
21	1	4
22	2	5
23	4	7
24	5	8

- 在 MATLAB 中, `sparse` 有一个特殊的性质 (summation property), 当某个位置指标出现两次, 则相应的值会相加. 这样, 使用如下命令 (`sparse(i, j, s)`, 若 s 为固定常数, 直接写常数即可)

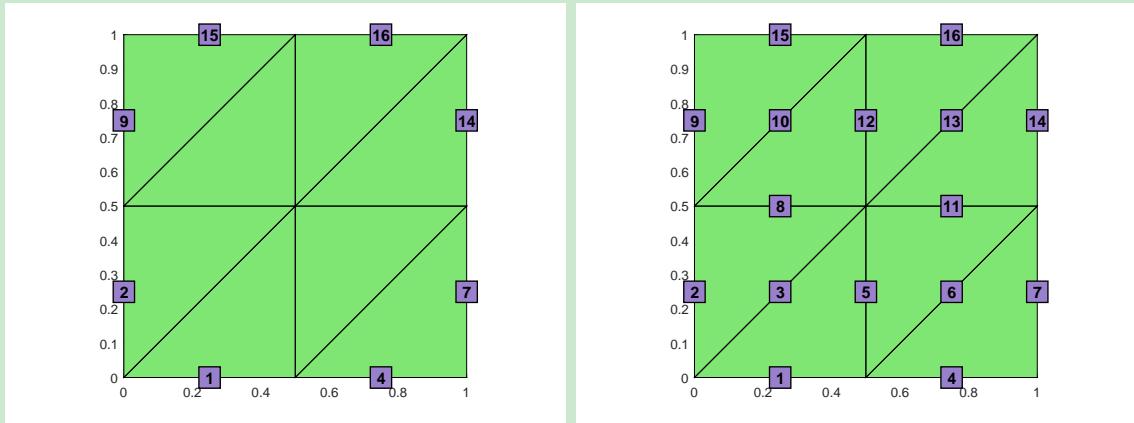
```
sparse(totalEdge(:, 1), totalEdge(:, 2), 1)
```

1-5 边对应的位置 (1,5) 的值就是 2, 而 1-2 对应的位置 (1,2) 为 1, 即重复边的都是 2, 不重复的为 1. 用 `find` 可找到所有非零元素的位置及相应的值 (非零元素只有 1 和 2, 对应边界边和内部边). 显然, `sparse` 命令产生的矩阵, 第一行对应起点 1 的边, 第二行对应起点 2 的边, 等等.

- 我们希望按下列方式排列边: 先找到所有起点为 1 的边, 再找所有起点为 2 的边, 等等. 由于 `find` 是按列找非零元素, 因此我们要把上一步的过程如下修改 (转置)

```
sparse(totalEdge(:, 2), totalEdge(:, 1), 1)
```

这样, 第一列对应的是起点为 1 的边, 第二列对应的是起点为 2 的边.



综上，我们可如下标记边界边或所有的边

```

1 % ----- edge -----
2 [node,elem] = squaremesh([0 1 0 1],0.5);
3 figure, % boundary edges
4 showmesh(node,elem);
5 bdInd = 1;
6 findedgeTr(node,elem,bdInd);
7 figure, % all edges
8 showmesh(node,elem);
9 findedgeTr(node,elem);

```

函数文件如下

```

1 function findedgeTr(node,elem,bdInd)
2 %FindedgeTr highlights edges for triangulation
3 % bdEdge = 1; % boundary edge;
4 % other cases: all edges
5
6 hold on
7 % ----- edge matrix -----
8 totalEdge = sort([elem(:,[2,3]); elem(:,[3,1]); elem(:,[1,2])],2);
9 [i,j,s] = find(sparse(totalEdge(:,2),totalEdge(:,1),1));
10 edge = [j,i];
11 % bdEdge = edge(s==1,:);
12
13 % ----- range -----
14 if nargin==2 || bdInd!=1
15     range = (1:size(edge,1))'; % all edges
16 else
17     range = find(s==1); % boundary edges

```

```

18 end
19
20 % ----- edge index -----
21 midEdge = (node(edge(range,1),:)+node(edge(range,2),:))/2;
22 plot(midEdge(:,1),midEdge(:,2),'s','LineWidth',1,'MarkerEdgeColor','k',...
23 'MarkerFaceColor',[0.6 0.5 0.8],'MarkerSize',20);
24 text(midEdge(:,1)-0.025,midEdge(:,2),int2str(range),...
25 'FontSize',12,'FontWeight','bold','Color','k');

```

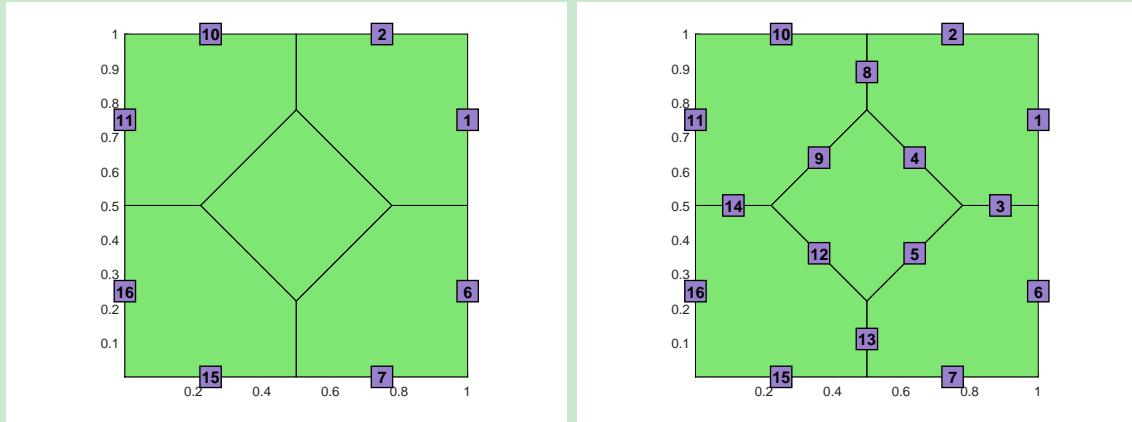
注意因为前面进行了转置, `edge = [j,i]`.

上面的思想也可用于多角形剖分, 只不过因边数不同, 要逐个单元存储每条边. 图 1.3 中第 1 个单元的顶点顺序为 [8,10,4,3,2], 我们按顺序 8-10, 10-4, 4-3, 3-2, 2-8 给出单元的边的标记. 所有边的起点就是 `elem` 中元素按列拉直给出的结果, 而终点就是对 [10,4,3,2,8] 这种循环的结果拉直. 可如下实现

```

1 % the starting points of edges
2 v0 = horzcat(elem{:})';
3
4 % the ending points of edges
5 shiftfun = @(verts) [verts(2:end),verts(1)];
6 T1 = cellfun(shiftfun, elem, 'UniformOutput', false);
7 v1 = horzcat(elem{:})';

```



其他过程与三角剖分一致. 如下运行

```

1 % ----- edge (polygonal meshes) -----
2 load('meshhex1.mat');
3 figure, % boundary edges
4 showmesh(node,elem);

```

```

5 bdInd = 1;
6 findedge(node, elem, bdInd)
7 figure, % all edges
8 showmesh(node, elem);
9 findedge(node, elem)

```

函数文件如下

CODE 1.6. fidedge.m

```

1 function fidedge(node, elem, bdInd)
2 %Finedge highlights edges
3 % bdEdge = 1; % boundary edge;
4 % other cases: all edges
5
6 hold on
7 % ----- edge matrix -----
8 if iscell(elem)
9     shiftfun = @(verts) [verts(2:end),verts(1)];
10    T1 = cellfun(shiftfun, elem, 'UniformOutput', false);
11    v0 = horzcat(elem{:})'; % the starting points of edges
12    v1 = horzcat(T1{:})'; % the ending points of edges
13    totalEdge = sort([v0,v1],2);
14 else
15    totalEdge = sort([elem(:,[2,3]); elem(:,[3,1]); elem(:,[1,2])],2);
16 end
17 [i,j,s] = find(sparse(totalEdge(:,2),totalEdge(:,1),1));
18 edge = [j,i];
19 % bdEdge = edge(s==1,:);
20
21 % ----- range -----
22 if nargin==2 || bdInd!=1
23    range = (1:size(edge,1))'; % all edges
24 else
25    range = find(s==1); % boundary edges
26 end
27
28 % ----- edge index -----
29 midEdge = (node(edge(range,1),:)+node(edge(range,2),:))/2;
30 plot(midEdge(:,1),midEdge(:,2),'s','LineWidth',1,'MarkerEdgeColor','k',...
31      'MarkerFaceColor',[0.6 0.5 0.8],'MarkerSize',20);

```

```
32 text(midEdge(:,1)-0.025,midEdge(:,2),int2str(range), ...
33     'FontSize',12,'FontWeight','bold','Color','k');
```

注 1.4 如果只是单纯生成 edge 矩阵, 那么也可如下

```
edge = unique(totalEdge,'rows');
```

unique 的速度要比前面给出的方式慢, 但后者方式可以用来生成对应单元的边界, 命名为 elem2edge, 它在计算中更重要.

第二章 辅助数据结构与几何量

网格中有许多数据在计算中很有用, 例如边的标记、单元的直径、面积等. 参考 iFEM 的相关内容, 见网页

<https://www.math.uci.edu/~chenlong/ifemdoc/mesh/auxstructuredoc.html>

本章针对一般的多角形剖分给出需要的数据结构与几何量.

2.1 辅助数据结构

我们的数据结构包括

表 2.1. 数据结构

node, elem	基本数据结构
elem2edge	边的自然序号 (单元存储)
edge	一维边的端点标记
bdEdge	边界边的端点标记
edge2elem	边的左右单元
neighbor	目标单元边的相邻单元

2.1.1 elem2edge 的生成

elem2edge 按单元记录每条边的自然序号, 这里同时会给出 edge, bdEdge.

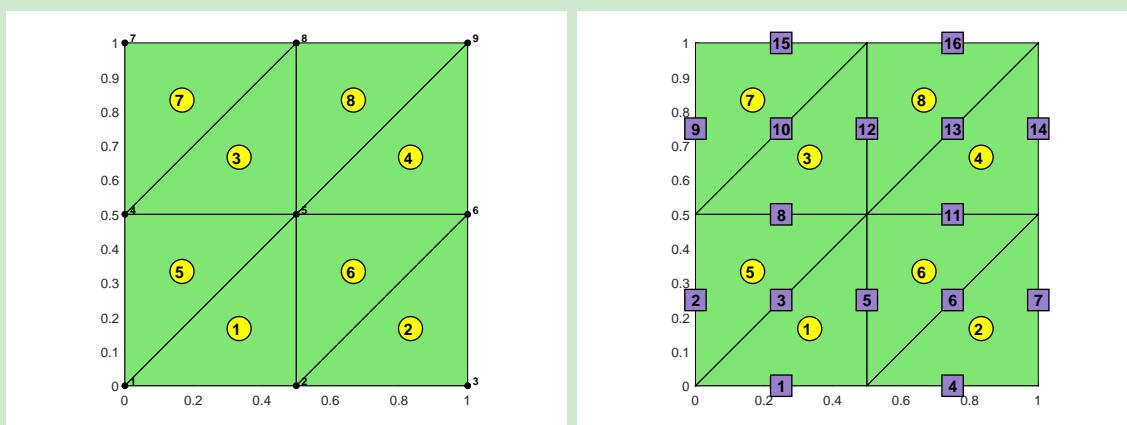


图 2.1. 三角剖分边的自然序号

考虑图 2.1 中给出的三角剖分, 我们说明一下 iFEM 中的思路.

- 根据前面的说明, 我们可给出含重复边的数组 `totalEdge` 见图 2.2(a).

	1	2
1	1	5
2	2	6
3	4	8
4	5	9
5	1	5
6	2	6
7	4	8
8	5	9
9	1	2
10	2	3
11	4	5
12	5	6
13	4	5
14	5	6
15	7	8
16	8	9
17	2	5
18	3	6
19	5	8
20	6	9
21	1	4
22	2	5
23	4	7
24	5	8

	1	2
1	1	2
2	1	4
3	1	5
4	2	3
5	2	5
6	2	6
7	3	6
8	4	5
9	4	7
10	4	8
11	5	6
12	5	8
13	5	9
14	6	9
15	7	8
16	8	9
17	9	11
18	10	12
19	11	13
20	12	14
21	13	15
22	14	16
23	15	17
24	16	18

	1
1	9
2	21
3	1
4	10
5	17
6	2
7	18
8	11
9	23
10	3
11	12
12	19
13	4
14	20
15	15
16	16
17	5
18	7
19	12
20	14
21	2
22	5
23	9
24	12

	1	3
1	2	6
3	10	13
4	13	3
5	3	6
6	6	10
7	10	13
8	13	1
9	1	11
10	4	8
11	8	11
12	11	8
13	8	14
14	11	11
15	15	15
16	16	16
17	5	7
18	7	12
19	12	14
20	14	2
21	2	22
22	5	5
23	9	9
24	12	12

图 2.2. elem2edge 图示

- 如下可去除重复的行, 即重复的边 (重复边一致化才能使用)

```
[edge, i1, totalJ] = unique(totalEdge, 'rows');
```

这里, `edge` 是 $NE \times 2$ 的矩阵, 对应边的集合, 注意 `unique` 会按第一列从小到大给出边 (相应地第二列也进行了排序), 见图 2.2(b).

`i1` 是 $NE \times 1$ 的数组, 它记录 `edge` 中的每条边在原来的 `totalEdge` 的位置 (重复的按第一次出现记录). 比如, 上面的 1-5 边, 第一次出现的序号是 1, 则 `i1` 第一个元素就是 1.

`totalJ` 记录的是 `totalEdge` 的每条边在 `edge` 中的自然序号. 比如, 1-5 在 `edge` 中是第 3 个, 则 `totalEdge` 的所有 1-5 边的序号为 3.

- 只要把 `totalJ` 恢复成三列即得所有三角形单元边的自然序号, 这是因为 `totalEdge` 排列的规则是: 前 NT 行对应所有单元的第 1 条边, 中间 NT 行对应第 2 条边, 最后 NT 行对应第 3 条边. 综上, 可如下获取 `elem2edge`.

```

1 % ----- elem2edge (triangulation) -----
2 [node, elem] = squaremesh([0 1 0 1], 0.5);
3 totalEdge = sort([elem(:, [2, 3]); elem(:, [3, 1]); elem(:, [1, 2])], 2);
4 [edge, i1, totalJ] = unique(totalEdge, 'rows');
5 NT = size(elem, 1);
6 elem2edge = reshape(totalJ, NT, 3);

```

结果如下

	1	2	3
1	3	1	5
2	6	4	7
3	10	8	12
4	13	11	14
5	3	8	2
6	6	11	5
7	10	15	9
8	13	16	12

上面的思路适用于多角形剖分, 只不过此时因边数不同, 要逐个单元存储每条边, 以保证对应 (三角形按局部边存储可快速恢复). 当我们获得 totalJ 后, 它与 totalEdge 的行对应, 从而可对应 elem 获得 elem2edge. 在 MATLAB 中可用 mat2cell 实现, 请参考相关说明. 我们把前面获取 edge, bdEdge 以及这里的 elem2edge 的过程放在一个 M 文件中

```

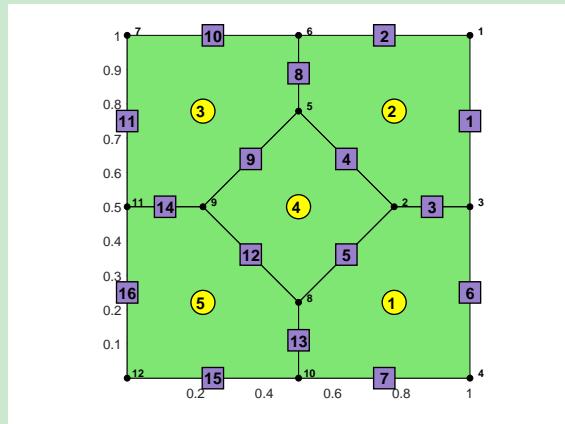
1 % % ----- elem2edge (triangulation) -----
2 % [node,elem] = squaremesh([0 1 0 1],0.5);
3 % showmesh(node,elem); findelem(node,elem); findnode(node);
4 % findedge(node,elem);
5
6 % ----- elem2edge (polygonal meshes) -----
7 load('meshhex1.mat');
8 showmesh(node,elem);
9 findnode(node); findelem(node,elem);
10 findedge(node,elem);
11
12 if iscell(elem)
13     % totalEdge
14     shiftfun = @(verts) [verts(2:end),verts(1)]; % or shiftfun = ...
15     %     @(verts) circshift(verts,-1);
16     T1 = cellfun(shiftfun, elem, 'UniformOutput', false);
17     v0 = horzcat(elem{:})'; % the starting points of edges
18     v1 = horzcat(T1{:})'; % the ending points of edges
19     totalEdge = sort([v0,v1],2);
20
21     % elem2edge
22     [~, ~, totalJ] = unique(totalEdge, 'rows');
23     elemLen = cellfun('length',elem); % length of each element
24     elem2edge = mat2cell(totalJ',1,elemLen)';

```

```

24
25 else % Triangulation
26     totalEdge = sort([elem(:,[2,3]); elem(:,[3,1]); elem(:,[1,2])],2);
27     [~, ~, totalJ] = unique(totalEdge, 'rows');
28     NT = size(elem,1);
29     elem2edge = reshape(totalJ,NT,3);
30 end
31
32 % ----- edge, bdEdge -----
33 [i,j,s] = find(sparse(totalEdge(:,2),totalEdge(:,1),1));
34 edge = [j,i];
35 bdEdge = edge(s==1,:);

```



结果如下

5x1 cell
1
2 [13,7,6,3,5]
3 [3,1,2,8,4]
4 [14,9,8,10,11]
5 [12,5,4,9]
6 [15,13,12,14,16]

(a) elem2edge

16x2 double
1 1 3
2 1 6
3 2 3
4 2 5
5 2 8
6 3 4
7 4 10
8 5 6
9 5 9
10 6 7
11 7 11
12 8 9
13 8 10
14 9 11
15 10 12
16 11 12

(b) edge

8x2 double
1 1 3
2 1 6
3 3 4
4 4 10
5 6 7
6 7 11
7 10 12
8 11 12

(c) bdEdge

图 2.3. Auxiliary mesh data structure

2.1.2 edge2elem 的生成

对给定的一条边 e , 有时候希望知道包含它的单元有哪些. 对内部边, 就是哪两个单元以 e 为公共边. 为此, 我们定义矩阵 `edge2elem`, 维数为 $\text{NE} \times 2$, 其中 NE 是一维边的个数. 它的第一列为左单元编号, 第二列为右单元编号. 注意, 对边界边我们规定两个编号一致.

	1	2
1	1	5
2	2	6
3	4	8
4	5	9
5	1	5
6	2	6
7	4	8
8	5	9
9	1	2
10	2	3
11	4	5
12	5	6
13	4	5
14	5	6
15	7	8
16	8	9
17	2	5
18	3	6
19	5	8
20	6	9
21	1	4
22	2	5
23	4	7
24	5	8

16x2 double		
1	1	2
1	1	4
2	1	5
3	1	5
4	2	3
5	2	5
6	2	6
7	3	6
8	4	5
9	4	7
10	4	8
11	5	6
12	5	8
13	5	9
14	6	9
15	7	8
16	7	9
17	8	11
18	9	23
19	10	3
20	11	12
21	12	19
22	13	4
23	14	20
24	15	15

16x1 double	
1	9
1	9
2	21
3	1
4	10
5	17
6	2
7	18
8	11
9	23
10	3
11	12
12	19
13	4
14	20
15	15
16	16
17	5
18	7
19	12
20	14
21	2
22	5
23	9
24	12

24x1 double	
1	3
1	3
2	6
3	10
4	13
5	3
6	6
7	10
8	13
9	1
10	4
11	8
12	11
13	8
14	11
15	15
16	16
17	5
18	7
19	12
20	14
21	2
22	5
23	9
24	12

(a) totalEdge

(b) edge

(c) i1

(d) totalJ

- `totalEdge` 记录了所有的重复边, 称第一次出现的重复边为左单元边, 第二次出现的重复边为右单元边. 根据前面的说明,

```
[~, i1, totalJ] = unique(totalEdge, 'rows');
```

执行上面语句给出的 `i1` 记录了左单元边.

- 类似地, 对 `totalEdge` 的逆序使用 `unique`:

```
[~, i2] = unique(totalEdge(end:-1:1,:), 'rows');
```

或

```
[~, i2] = unique(totalJ(end:-1:1), 'rows');
```

给出的 `i2` 记录了右单元边, 但现在的序号与原先的有差别. 以图中的例子为例, 此时 1 相当于原来的 24, 2 相当于 23, 依此类推. 它们的和总是 25, 即 `length(totalEdge)+1` (三角形为 $3 \times NT + 1$). 这样, 还原后的为

```
i2 = length(totalEdge)+1-i2;
```

- `totalJ` 或 `totalEdge` 并不是逐个单元存储的. 对三角剖分, 它是如下存储的

所有单元的第 1 条边: `elem(:, [2,3]); % NT * 2`

所有单元的第 2 条边: `elem(:, [3,1]); % NT * 2`

所有单元的第 3 条边: `elem(:, [1,2]); % NT * 2`

即, 前 NT 行与所有单元的第 1 条边对应, 中间的 NT 行与所有单元的第 2 条边对应, 最后的 NT 行与所有单元的第 3 条边对应. 设 totalJ 行的单元序号为 totalJelem, 则

```
totalJelem = repmat((1:NT)', 3, 1);
```

- 综上, 对三角形剖分, 有

```
edge2elem = totalJelem([i1, i2]);
```

- 对多角形剖分, 只要修改 totalJelem 即可. 对多角形情形, totalEdge 是按单元排列的, 只要按单元边数进行编号即可. 例如, 前面给出的例子, 每个单元的边数为

5x1 double	
1	
1	5
2	5
3	5
4	4
5	5

这里, 第 1 个单元有 5 条边, 第 2 个单元有 5 条边, 等等. 为此, totalJelem 的前 5 行都为 1 (对应单元 1), 接着的 5 行为 2, 等等. 如下给出

```
1 Num = num2cell((1:NT)');
2 Len = num2cell(cellLen);
3 totalJelem = cellfun(@(n1,n2) n1*ones(n2,1), Num, Len, ...
'UniformOutput', false);
4 totalJelem = vertcat(totalJelem{:});
```

综上, 可如下实现 edge2elem

```
1 % ----- edge2elem -----
2 if iscell(elem)
3     Num = num2cell((1:NT)'); Len = num2cell(cellLen);
4     totalJelem = cellfun(@(n1,n2) n1*ones(n2,1), Num, Len, ...
'UniformOutput', false);
5     totalJelem = vertcat(totalJelem{:});
6 else
7     totalJelem = repmat((1:NT)', 3, 1);
8 end
9 [~, i2] = unique(totalJ(end:-1:1), 'rows');
10 i2 = length(totalEdge)+1-i2;
11 edge2elem = totalJelem([i1, i2]);
```

多角形剖分结果如下

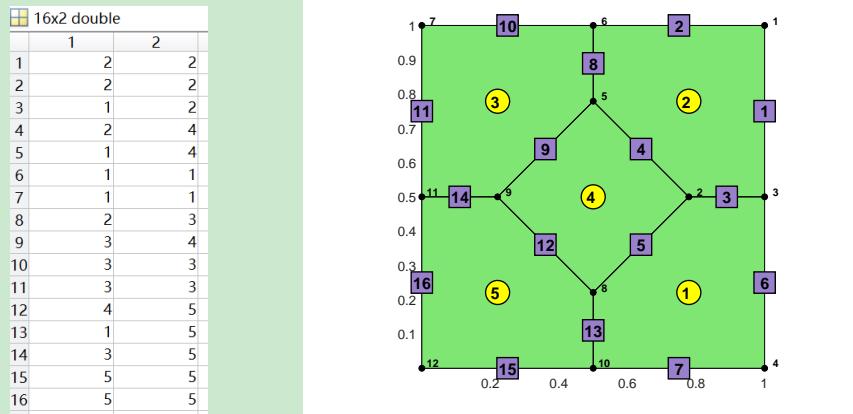


图 2.4. edge2elem

例如, 序号 12 的边连接的两个单元编号为 4 和 5.

注 2.1 totalEdge 是按单元顺序排列的, i_1 对应 e 第一次出现的单元, i_2 对应第二次出现的单元, 自然 edge2elem 的第一列单元序号小于或等于第二列单元序号.

2.1.3 neighbor 的生成

neighbor 是 $NT \times NE$ 的矩阵, 它的结构如下

neighbor 的结构		
i	j	$\text{neighbor}(i, j)$
K_i	e_j	相邻三角形

$\text{edge2elem}(:, 1)$ 对应左单元 K_i , 行索引对应边 e_j , 相邻三角形是 $\text{edge2elem}(:, 2)$.

$\text{edge2elem}(:, 2)$ 对应右单元 K_i , 行索引对应边 e_j , 相邻三角形是 $\text{edge2elem}(:, 1)$.

可用 sparse 实现 neighbor.

```

1 % ----- neighbor -----
2 NE = size(edge,1);
3 ii1 = edge2elem(:,1); jj1 = (1:NE)'; ss1 = edge2elem(:,2);
4 ii2 = edge2elem(:,2); jj2 = (1:NE)'; ss2 = edge2elem(:,1);
5 label = (ii2≠ss2);
6 ii2 = ii2(label); jj2 = jj2(label); ss2 = ss2(label);
7 ii = [ii1;ii2]; jj = [jj1;jj2]; ss = [ss1;ss2];
8 neighbor = sparse(ii,jj,ss,NT,NE);

```

注 2.2 本文给出的 neighbor 与 iFEM 不同, 那里是按单元给出每个顶点相对的单元序号, 这是由三角形的特殊性决定的.

2.2 网格相关的几何量

几何量包括

表 2.2. 几何量

Centroid	单元重心坐标
area	单元面积
diameter	单元直径

- 单元的重心如下计算

$$x_K = \frac{1}{6|K|} \sum_{i=0}^{N_v-1} (x_i + x_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i),$$

$$y_K = \frac{1}{6|K|} \sum_{i=0}^{N_v-1} (y_i + y_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i),$$

这里 N_v 是单元顶点个数.

- 单元面积

$$|K| = \frac{1}{2} \left| \sum_{i=0}^{N_v-1} x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i \right|.$$

- 单元直径就是所有顶点之间最长的距离, MATLAB 提供了 pdist 函数, 它计算各对行向量的相互距离.

以上几何量可如下获得

```

1 % ----- elemCentroid, area, diameter -----
2 Centroid = zeros(NT,2); area = zeros(NT,1); diameter = zeros(NT,1);
3 s = 1;
4 for iel = 1:NT
5     if iscell(elem)
6         index = elem{iel};
7     else
8         index = elem(iel,:);
9     end
10    verts = node(index, :); verts1 = verts([2:end,1],:);
11    area_components = verts(:,1).*verts1(:,2)-verts1(:,1).*verts(:,2);

```

```

12     ar = 0.5*abs(sum(area_components));
13     area(iel) = ar;
14     Centroid(s,:) = ...
15         sum((verts+verts1).*repmat(area_components,1,2))/(6*ar);
16     diameter(s) = max(pdist(verts));
17     s = s+1;
18 end

```

2.3 auxstructure 与 auxgeometry 函数

为了输出方便, 我们把所有的数据结构或几何量保存在结构体 aux 中. 考虑到数据结构在编程中不一定使用 (处理网格时用), 我们把数据结构与几何量分别用函数生成, 命名为 auxstructure.m 和 auxgeometry.m. 为了方便使用, 程序中把三角剖分按单元存储的数据转化为元胞数组. auxstructure.m 函数如下

CODE 2.1. auxstructure.m

```

1 function aux = auxstructure(node,elem)
2
3 NT = size(elem,1);
4 if iscell(elem)
5     % totalEdge
6     shiftfun = @(verts) [verts(2:end),verts(1)]; % or shiftfun = ...
6     @(verts) circshift(verts,-1);
7     T1 = cellfun(shiftfun, elem, 'UniformOutput', false);
8     v0 = horzcat(elem{:})'; % the starting points of edges
9     v1 = horzcat(T1{:})'; % the ending points of edges
10    totalEdge = sort([v0,v1],2);
11
12    % ----- elem2edge: elementwise edges -----
13    [~, i1, totalJ] = unique(totalEdge,'rows');
14    elemLen = cellfun('length',elem); % length of each elem
15    elem2edge = mat2cell(totalJ,elemLen,1);
16    elem2edge = cellfun(@transpose, elem2edge, 'UniformOutput', false);
17
18 else % Triangulation
19    totalEdge = sort([elem(:,[2,3]); elem(:,[3,1]); elem(:,[1,2])],2);
20    [~, i1, totalJ] = unique(totalEdge,'rows');
21    elem2edge = reshape(totalJ,NT,3);
22 end

```

```

23
24 % ----- edge, bdEdge -----
25 [i,j,s] = find(sparse(totalEdge(:,2),totalEdge(:,1),1));
26 edge = [j,i];
27 bdEdge = edge(s==1,:);
28
29 % ----- edge2elem -----
30 if iscell(elem)
31     Num = num2cell((1:NT)');      Len = num2cell(elemLen);
32     totalJelem = cellfun(@(n1,n2) n1*ones(n2,1), Num, Len, ...
33                           'UniformOutput', false);
34     totalJelem = vertcat(totalJelem{:});
35 else
36     totalJelem = repmat((1:NT)',3,1);
37 end
38 [~, i2] = unique(totalJ(end:-1:1), 'rows');
39 i2 = length(totalEdge)+1-i2;
40 edge2elem = totalJelem([i1,i2]);
41
42 % ----- neighbor -----
43 ii1 = edge2elem(:,1); jj1 = (1:NE)'; ss1 = edge2elem(:,2);
44 ii2 = edge2elem(:,2); jj2 = (1:NE)'; ss2 = edge2elem(:,1);
45 label = (ii2==ss2);
46 ii2 = ii2(label); jj2 = jj2(label); ss2 = ss2(label);
47 ii = [ii1;ii2]; jj = [jj1;jj2]; ss = [ss1;ss2];
48 neighbor = sparse(ii,jj,ss,NT,NE);
49
50
51 if ~iscell(elem) % transform to cell
52     elem = mat2cell(elem,ones(NT,1),3);
53     elem2edge = mat2cell(elem2edge,ones(NT,1),3);
54 end
55
56 aux.node = node; aux.elem = elem;
57 aux.elem2edge = elem2edge;
58 aux.edge = edge; aux.bdEdge = bdEdge;
59 aux.edge2elem = edge2elem;
60 aux.neighbor = neighbor;

```

auxgeometry.m 函数如下

CODE 2.2. auxgeometry.m

```
1 function aux = auxgeometry(node, elem)
2
3 % ----- elemCentroid, area, diameter -----
4 NT = size(elem,1);
5 Centroid = zeros(NT,2); area = zeros(NT,1); diameter = zeros(NT,1);
6 s = 1;
7 for iel = 1:NT
8     if iscell(elem)
9         index = elem{iel};
10    else
11        index = elem(iel,:);
12    end
13    verts = node(index, :); verts1 = verts([2:end,1],:);
14    area_components = verts(:,1).*verts1(:,2)-verts1(:,1).*verts(:,2);
15    ar = 0.5*abs(sum(area_components));
16    area(iel) = ar;
17    Centroid(s,:) = ...
18        sum((verts+verts1).*repmat(area_components,1,2))/(6*ar);
19    diameter(s) = max(pdist(verts));
20    s = s+1;
21
22 if ~iscell(elem) % transform to cell
23     elem = mat2cell(elem, ones(NT,1), 3);
24 end
25
26 aux.node = node; aux.elem = elem;
27 aux.Centroid = Centroid;
28 aux.area = area;
29 aux.diameter = diameter;
```

2.4 边界设置

假设网格的边界只有 Dirichlet 与 Neumann 两种类型, 前者用 `eD` 存储 Dirichlet 节点的编号, 后者用 `elemN` 存储 Neumann 边界的起点和终点编号 (即一维问题的连通性信息). 为了方便, 有时候需要 Dirichlet 边的信息, 为此我们用 `elemD` 存储 Dirichlet 边界的起点和终

点编号.

2.4.1 边界边的定向

辅助数据结构中曾给出了边界边 `bdEdge`, 但它的定向不再是逆时针, 因为我们规定 $\text{edge}(k, 1) < \text{edge}(k, 2)$. Neumann 边界条件中会遇到 $\partial_n u$, 这就需要我们恢复边界边的定向以确定外法向量(边的旋转获得).

给定 `totalEdge`, 即所有单元的边(含重复且无定向), 我们有两种方式获得边(第一种可获得边界边, 第二种只获得所有边):

- 一是累计重复的次数(1是边界, 2是内部)

```
1 [i, j, s] = find(sparse(totalEdge(:, 2), totalEdge(:, 1), 1));
2 edge = [j, i];
3 bdEdge = edge(s==1, :);
```

- 二是直接去掉重复的边

```
1 [edge, i1, ~] = unique(totalEdge, 'rows');
```

这里, `i1` 记录的是 `edge` 在重复边 `totalEdge` 中的位置.

显然, `i1(s==1)` 给出的是边界边 `bdEdge` 在 `totalEdge` 中的位置. `totalEdge` 的原来定向是知道的, 由此就可确定边界边的定向, 程序如下

```
1 [node, elem] = squaremesh([0 1 0 1], 0.5);
2 NT = size(elem, 1);
3 % totalEdge
4 if iscell(elem)
5     shiftfun = @(verts) [verts(2:end), verts(1)];
6     T1 = cellfun(shiftfun, elem, 'UniformOutput', false);
7     v0 = horzcat(elem{:})'; % the starting points of edges
8     v1 = horzcat(T1{:})'; % the ending points of edges
9     allEdge = [v0, v1];
10    totalEdge = sort(allEdge, 2);
11 else
12     allEdge = [elem(:, [2, 3]); elem(:, [3, 1]); elem(:, [1, 2])];
13     totalEdge = sort(allEdge, 2);
14 end
15 [~, ~, s] = find(sparse(totalEdge(:, 2), totalEdge(:, 1), 1));
16 [edge, i1, ~] = unique(totalEdge, 'rows');
```

```
17 bdEdge = allEdge(i1(s==1), :); % counterclockwise
```

注 2.3 边界边 `bdEdge` 在一维边集合 `edge` 中的自然序号为

```
bdIndex = find(s==1);
```

2.4.2 边界的设置

下面说明如何实现 `eD`, `elemD` 和 `elemN`. 以下图为例

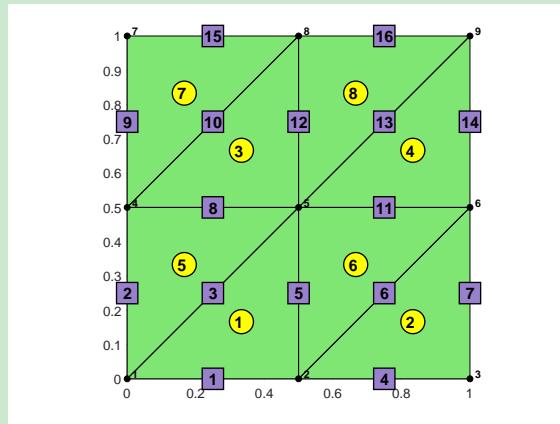


图 2.5. 边的自然序号

- 边界边的序号顺序为 $1, 2, 4, 7, 9, 14, 15, 16$. 定向的 `bdEdge` 给出的是这些边的起点与终点编号, 只要按索引对应即可.
- 边界我们用函数确定, 例如矩形 $[0,1]^2$ 的右边界为满足 $x = 1$ 的线段组成. 只需要判断 `bdEdge` 对应的边的中点在不在该线段上. 如下

```
1 bdFun = 'x==1';
2 nodebdEdge = (node(bdEdge(:,1),:) + node(bdEdge(:,2),:))/2;
3 x = nodebdEdge(:,1); y = nodebdEdge(:,2);
4 id = eval(bdFun);
```

这里, `eval` 将字符串视为语句并运行. 现在给定了若干个 `x`, 执行 `eval(bdFun)` 就会判断哪些 `x` 满足条件, 返回的是逻辑数组 `id = [0 0 0 1 0 1 0 0]`, 即索引中的第 4,6 条边在右边界上.

- 这样, 我们就可抽取出需要的边 `bdEdge(id,:)`. 需要注意的是, `node` 在边界上不一定精确为 1, 通常将上面的 `bdFun` 修改为

```
bdFun = 'abs(x-1)<1e-4';
```

- Neumann 边界通常比 Dirichlet 边界少, 为此在建函数的时候, 输入的字符串默认认为是 Neumann 边界的, 其他的都是 Dirichlet. 另外, 当没有边界字符串的时候, 规定所有边都是 Dirichlet 边.

根据上面的讨论, 我们可以给出函数 setboundary.m

CODE 2.3. setboundary.m

```

1 function bdStruct= setboundary(node, elem, varargin)
2 % varargin: string for Neumann boundary
3
4 % ----- totalEdge -----
5 if iscell(elem)
6     shiftfun = @(verts) [verts(2:end),verts(1)]; % or shiftfun = ...
7     @(verts) circshift(verts,-1);
8     T1 = cellfun(shiftfun, elem, 'UniformOutput', false);
9     v0 = horzcat(elem{:})'; % the starting points of edges
10    v1 = horzcat(T1{:})'; % the ending points of edges
11    allEdge = [v0,v1];
12 else % Triangulation
13     allEdge = [elem(:,[2,3]); elem(:,[3,1]); elem(:,[1,2])];
14 end
15 totalEdge = sort(allEdge,2);
16
17 % ----- counterclockwise bdEdge -----
18 [~,~,s] = find(sparse(totalEdge(:,2),totalEdge(:,1),1));
19 [~, i1, ~] = unique(totalEdge, 'rows');
20 bdEdge = allEdge(i1(s==1),:);
21
22 % ----- set boundary -----
23 nE = size(bdEdge,1);
24 % initial as Dirichlet (true for Dirichlet, false for Neumann)
25 bdFlag = true(nE,1);
26 nodebdEdge = (node(bdEdge(:,1),:) + node(bdEdge(:,2),:))/2;
27 x = nodebdEdge(:,1); y = nodebdEdge(:,2);
28 nvar = length(varargin); % 1 * size(varargin,2)
29 % note that length(varargin) = 1 for bdNeumann = [] or ''
30 if (nargin==2) || (~isempty(varargin{1}))
31     for i = 1:nvar
32         bdNeumann = varargin{i};
33         id = eval(bdNeumann);

```

```
33         bdFlag(id) = false;
34     end
35 end
36 bdStruct.eD = unique(bdEdge(bdFlag,:));
37 bdStruct.elemN = bdEdge(~bdFlag,:);
```

这里, `ed` 和 `elemN` 保存在结构体 `bdStruct` 中. 例如,

1. 以下命令给出的边界全是 Dirichlet 边界:

```
bdStruct = setboundary(node, elem);
bdStruct = setboundary(node, elem, []);
bdStruct = setboundary(node, elem, '');
```

2. `bdStruct = setboundary(node, elem, 'x==1')` 将右边界设为 Neumann 边, 其他为 Dirichlet 边.

3. `bdStruct = setboundary(node, elem, '(x==1)|(y==1)')` 将右边界与上边界设为 Neumann 边.

注 2.4 以下两种写法等价

```
bdStruct = setboundary(node, elem, '(x==1)|(y==1)');
bdStruct = setboundary(node, elem, 'x==1', 'y==1');
```

第三章 一维问题的有限元方法

以如下的混合边值问题作为本章的模型问题

$$\begin{cases} -u'' + cu = f(x), & 0 < x < 1, \\ u(0) = 0, \quad u'(1) = 0, \end{cases} \quad (3.1)$$

其中 $c > 0$ 是常数. 变分问题为: 找 $u \in V$, 使得

$$a(u, v) = \ell(v) \quad \forall v \in V, \quad (3.2)$$

式中,

$$\begin{aligned} a(u, v) &= \int_0^1 (u'v' + cuv)dx, \quad \ell(v) = (f, v) = \int_0^1 fvdx, \\ V &= \{v \in L^2(0, 1) : a(v, v) < \infty, \quad v(0) = 0\}. \end{aligned}$$

3.1 单元与整体的关系

有限元编程中最重要的就是如何从单元刚度矩阵和单元载荷向量获得整体刚度矩阵和整体载荷向量, 我们称这个过程为装配. 为了实现装配, 首先必须弄清楚单元刚度矩阵或载荷向量与整体刚度矩阵或载荷向量的关系.

有限元方法是基于变分形式的数值方法, 在乘以检验函数并分部积分时, 就不可避免地要遇到边界项. 例如, 对模型问题 (3.1), 在不考虑边界条件下, 变分形式应该为

$$\int_0^1 (u'v' + cuv)dx - u'|_0^1 = \int_0^1 f(x)v(x)dx.$$

对高维问题, $-u'|_0^1$ 通常对应边界积分. 要注意, 对不同的边界条件, 边界积分可能含有未知量, 对模型问题 (3.1), 它恰好为零. 为了方便, 我们统称边界积分项和边界条件为边界项, 而且为了一般性, 有限元编程的一个重要原则是: 最后处理边界项. 为了突出省略了边界项, 变分形式写为

$$\int_0^1 (u'v' + cuv)dx \sim \int_0^1 f(x)v(x)dx,$$

符号 “ \sim ” 表示省略了边界项.

3.1.1 整体节点基与局部节点基

设所考虑问题的区域为 $\Omega = (0, 1)$, 给定划分 $0 = x_0 < x_1 < \dots < x_n = 1$, 设 $K_j = [x_{j-1}, x_j]$, $j = 1, 2, \dots, n$, 则可引入分段线性函数空间 (不包含边界条件)

$$V_h = \{v \in C(\bar{\Omega}) : v \text{ 在每个 } K_j = [x_{j-1}, x_j] \text{ 上连续且为一次函数}, j = 1, 2, \dots, n\}.$$

我们知道, 每个节点 x_i 都对应一个节点基 $\Phi_i(x)$, 满足 $\Phi_i(x_j) = \delta_{ij}$, $0 \leq i, j \leq n$, 它们合起来构成空间 V_h 的一组基. 这些基的图像如下图所示

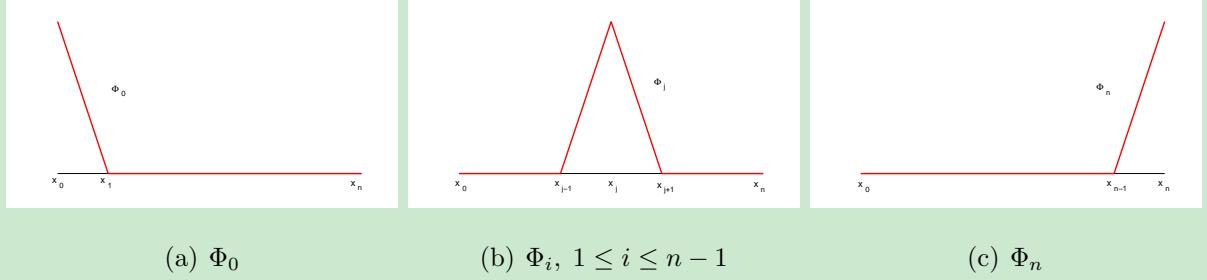


图 3.1. 整体基函数 $\Phi_i, i = 0, 1, \dots, n$

如果把整个区域 $\bar{\Omega}$ 换成单元 $K = [x_{j-1}, x_j]$, 那么可得两个节点基 ϕ_1, ϕ_2 , 其图像如下图所示

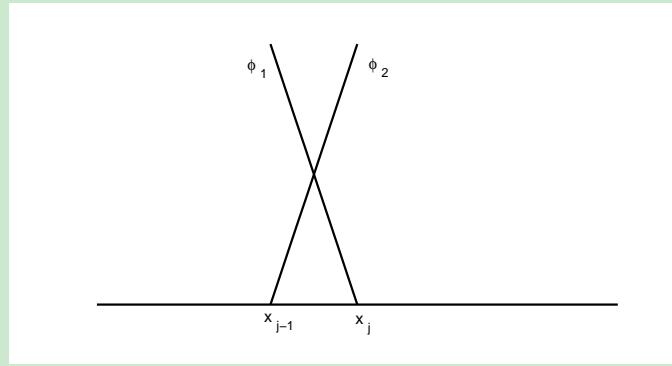


图 3.2. 单元 K 的节点基

我们称 ϕ_1, ϕ_2 为局部节点基.

一个重要的关系就是, 整体节点基限制在单元上就是局部节点基. 例如,

$$\Phi_{j-1}|_K = \phi_1, \quad \Phi_j|_K = \phi_2.$$

之所以成立, 是因为 $\Phi_{j-1}|_K$ 是一次函数, 且 $\Phi_{j-1}|_K(x_{j-1}) = 1$, $\Phi_{j-1}|_K(x_j) = 0$. 这个关系对高维问题仍成立, 正是有这一条性质才导致有限元可以很方便地按单元考虑.

3.1.2 整体刚度矩阵与单元刚度矩阵的关系

在不考虑边界项时, 整体刚度矩阵可由单元刚度矩阵获得, 我们以模型问题 (3.1) 来说明装配的过程.

步 1: 第 j 个方程及其单元分解

设整体基函数为 $\Phi_0, \Phi_1, \dots, \Phi_n$ (视 u_0 也为变量), 待求函数表为

$$u = \sum_{i=0}^n u_i \Phi_i,$$

则系统方程组的第 j ($= 0, 1, \dots, n$) 个方程就是在 (3.2) 中取 $v = \Phi_j$. 按单元求和, 左端和右端分别为

$$\begin{aligned} a(u, v) &= \int_0^1 (u'v' + cuv) dx = \sum_{i=1}^n \int_{x_{i-1}}^{x_i} (u'v' + cuv) dx, \quad v = \Phi_j, \\ \ell(v) &= \sum_{i=1}^n \int_{x_{i-1}}^{x_i} fv dx, \quad v = \Phi_j. \end{aligned}$$

为此, 可以先考虑单元上的部分, 即

$$\begin{aligned} a(u, v)_{K_i} &= \int_{x_{i-1}}^{x_i} (u'v' + cuv) dx, \quad v = \Phi_j, \\ \ell(v)_{K_i} &= \int_{x_{i-1}}^{x_i} fv dx, \quad v = \Phi_j, \end{aligned}$$

它们是第 j 个方程的组成成分, 加起来的过程就是合并同类项.

步 2: 单元上的形式

设单元 K_i 上两个局部节点基为 ϕ_1 和 ϕ_2 , 则 u 限制在 K_i 就是 $u_{i-1}\phi_1 + u_i\phi_2$, 即

$$u = u_{i-1}\phi_1 + u_i\phi_2, \quad x \in K_i,$$

于是

$$a(u, v)_{K_i} = \int_{x_{i-1}}^{x_i} [(u_{i-1}\phi_1 + u_i\phi_2)'v' + c(u_{i-1}\phi_1 + u_i\phi_2)v] dx, \quad v = \Phi_j.$$

在逐个代入 $v = \Phi_j$ 时, 单元 K_i 上有贡献的只有 Φ_{i-1} 和 Φ_i , 局部上恰好对应 ϕ_1 和 ϕ_2 , 也就是说单元 K_i 上的积分实际上只在第 $i-1$ 个方程和第 i 个方程上有贡献, 它们分别为

$$\begin{aligned} v = \Phi_{i-1} : \quad \int_{x_{i-1}}^{x_i} [(u_{i-1}\phi_1 + u_i\phi_2)' \phi'_1 + c(u_{i-1}\phi_1 + u_i\phi_2)\phi_1] dx &\sim \int_{x_{i-1}}^{x_i} f\phi_1 dx, \\ v = \Phi_i : \quad \int_{x_{i-1}}^{x_i} [(u_{i-1}\phi_1 + u_i\phi_2)' \phi'_2 + c(u_{i-1}\phi_1 + u_i\phi_2)\phi_2] dx &\sim \int_{x_{i-1}}^{x_i} f\phi_2 dx, \end{aligned}$$

写成矩阵形式为

$$\int_{x_{i-1}}^{x_i} \begin{bmatrix} \phi'_1 \phi'_1 + c\phi_1 \phi_1 & \phi'_2 \phi'_1 + c\phi_2 \phi_1 \\ \phi'_1 \phi'_2 + c\phi_1 \phi_2 & \phi'_2 \phi'_2 + c\phi_2 \phi_2 \end{bmatrix} dx \begin{bmatrix} u_{i-1} \\ u_i \end{bmatrix} \sim \int_{x_{i-1}}^{x_i} \begin{bmatrix} f\phi_1 \\ f\phi_2 \end{bmatrix} dx.$$

可以看到左边的矩阵恰是单元刚度矩阵, 右边的向量恰是单元载荷向量. 注意矩阵的第一行对应 $v = \Phi_{i-1}$, 它应加到第 $i-1$ 个系统方程中, 第二行对应 $v = \Phi_i$, 它应加到第 i 个系统方程中, 与这里的变量 $[u_{i-1}, u_i]^T$ 正好对应.

步 3: 遍历所有单元

当遍历所有单元后, 就得到系统方程组, 而遍历的过程恰好是把单元刚度矩阵的分量加到整体刚度矩阵的对应位置.

3.2 刚度矩阵与载荷向量的装配

3.2.1 载荷向量的装配

我们已经看到, 装配的过程就是把单元刚度矩阵或载荷向量的元素加到整体刚度矩阵或载荷向量的正确位置, 这就需要局部与整体编号的一种对应.

为了方便, 我们先考虑载荷向量的装配. 设单元 $K_i = [x_{i-1}, x_i]$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 上的两个局部节点基为 ϕ_1, ϕ_2 , 单元载荷向量为

$$F_{K_i} = \begin{bmatrix} \ell_{K_i}(\phi_1) \\ \ell_{K_i}(\phi_2) \end{bmatrix}.$$

对单元载荷向量, 可如下分析

a) ϕ_1 在 K_i 上对应的恰是左端点的整体节点基 Φ_{i-1} , ϕ_2 在 K_i 上对应的恰是右端点的整体节点基 Φ_i , 于是单元载荷向量用整体基函数表示为

$$F_{K_i} = \begin{bmatrix} \ell_{K_i}(\phi_1) \\ \ell_{K_i}(\phi_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ell_{K_i}(\Phi_{i-1}) \\ \ell_{K_i}(\Phi_i) \end{bmatrix}.$$

b) $\ell_{K_i}(\Phi_{i-1})$ 是 $\ell(\Phi_{i-1})$ 的一部分, 自然贡献给 $F_{i-1} = \ell(\Phi_{i-1})$;

$\ell_{K_i}(\Phi_i)$ 是 $\ell(\Phi_i)$ 的一部分, 自然贡献给 $F_i = \ell(\Phi_i)$.

c) 因此有如下贡献关系

$$F_{K_i} = \begin{bmatrix} \ell_{K_i}(\phi_1) \\ \ell_{K_i}(\phi_2) \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} F_{i-1} \\ F_i \end{bmatrix}.$$

综上, 我们可以获得如下的装配算法.

1. 初始化载荷向量 F 为零向量, 注意行对应 u_0, u_1, \dots, u_n , 设单元编号 $i = 1$.
2. 计算相应的单元载荷 F_{K_i} .
3. 把单元向量的分量加入到整体载荷向量的对应位置

$$\begin{aligned} F_{i-1} &\leftarrow F_{i-1} + F_{K_i}(1), \\ F_i &\leftarrow F_i + F_{K_i}(2). \end{aligned}$$

4. $i \leftarrow i + 1$, 转到第 2 步, 直到 $i = n + 1$ 结束.
-

上面的装配过程表明有如下的局部与整体对应

index : $\{1, 2\}$ (local) \rightarrow $\{i-1, i\}$ (global), 对单元 K_i ,

即

$$\text{index}(1) = i - 1, \quad \text{index}(2) = i,$$

我们称 index 为装配指标. 显然, 局部整体对应与单元的连通性是一致的.

3.2.2 刚度矩阵的装配

当 x_i, x_j 不相邻时, $K_{ij} = 0$, 故 K 是一个稀疏矩阵(且对称). 设单元 $K_i = [x_{i-1}, x_i]$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 的两个节点基为 ϕ_1, ϕ_2 , 对应的单元刚度矩阵为

$$A_{K_i} = \begin{bmatrix} a(\phi_1, \phi_1)_{K_i} & a(\phi_1, \phi_2)_{K_i} \\ a(\phi_2, \phi_1)_{K_i} & a(\phi_2, \phi_2)_{K_i} \end{bmatrix}.$$

对单元刚度矩阵, 如下分析

a) ϕ_1 在 K_i 上对应的恰是 Φ_{i-1} , ϕ_2 在 K_i 上对应的恰是 Φ_i , 于是单元刚度矩阵用整体基函数表示为

$$A_{K_i} = \begin{bmatrix} a(\phi_1, \phi_1)_{K_i} & a(\phi_1, \phi_2)_{K_i} \\ a(\phi_2, \phi_1)_{K_i} & a(\phi_2, \phi_2)_{K_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a(\Phi_{i-1}, \Phi_{i-1})_{K_i} & a(\Phi_{i-1}, \Phi_i)_{K_i} \\ a(\Phi_i, \Phi_{i-1})_{K_i} & a(\Phi_i, \Phi_i)_{K_i} \end{bmatrix}.$$

b) $a(\Phi_{i-1}, \Phi_{i-1})_{K_i}$ 是 $a(\Phi_{i-1}, \Phi_{i-1})$ 的一部分, 自然贡献给 $K_{i-1,i-1} = a(\Phi_{i-1}, \Phi_{i-1})$;

$a(\Phi_{i-1}, \Phi_i)_{K_i}$ 是 $a(\Phi_{i-1}, \Phi_i)$ 的一部分, 自然贡献给 $K_{i-1,i} = a(\Phi_{i-1}, \Phi_i)$;

$a(\Phi_i, \Phi_{i-1})_{K_i}$ 是 $a(\Phi_i, \Phi_{i-1})$ 的一部分, 自然贡献给 $K_{i,i-1} = a(\Phi_i, \Phi_{i-1})$;

$a(\Phi_i, \Phi_i)_{K_i}$ 是 $a(\Phi_i, \Phi_i)$ 的一部分, 自然贡献给 $K_{i,i} = a(\Phi_i, \Phi_i)$.

c) 因此有如下贡献关系

$$A_{K_i} = \begin{bmatrix} a(\phi_1, \phi_1)_{K_i} & a(\phi_1, \phi_2)_{K_i} \\ a(\phi_2, \phi_1)_{K_i} & a(\phi_2, \phi_2)_{K_i} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} K_{i-1,i-1} & K_{i-1,i} \\ K_{i,i-1} & K_{i,i} \end{bmatrix}.$$

我们有如下装配算法.

刚度矩阵的装配

1. 初始化刚度矩阵 K 为零矩阵, 注意行对应 u_0, u_1, \dots, u_n , 设单元编号 $i = 1$.
2. 计算相应的单元刚度矩阵 A_{K_i} .
3. 把单元矩阵的分量加入到整体刚度矩阵的对应位置

$$\begin{aligned} K_{i-1,i-1} &\leftarrow K_{i-1,i-1} + A_{K_i}(1,1), \\ K_{i-1,i} &\leftarrow K_{i-1,i} + A_{K_i}(1,2), \\ K_{i,i-1} &\leftarrow K_{i,i-1} + A_{K_i}(2,1), \\ K_{i,i} &\leftarrow K_{i,i} + A_{K_i}(2,2). \end{aligned}$$

4. $i \leftarrow i + 1$, 转到第 2 步, 直到 $i = n + 1$ 结束.
-

注意到

$$\begin{bmatrix} K_{i-1,i-1} & K_{i-1,i} \\ K_{i,i-1} & K_{i,i} \end{bmatrix}$$

恰好在矩阵三对角位置上, 因此整体刚度矩阵是三对角的. 一般而言, 单元刚度矩阵不是对称的, 若是对称的, 则只要计算上三角部分.

3.2.3 指标装配法

鉴于 MATLAB 向量标号是从 1 开始, 以下也遵循这个规定, 并给出如下的 5 个线性单元剖分.

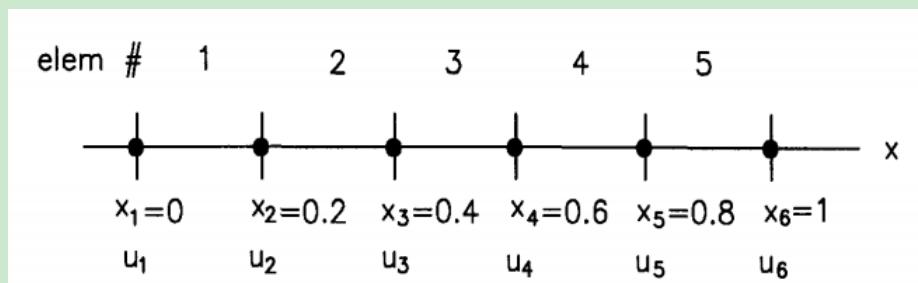


图 3.3. 5 个线性单元的剖分

设单元方程如下

$$\begin{bmatrix} k_{11}^i & k_{12}^i \\ k_{21}^i & k_{22}^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ u_{i+1} \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} F_i \\ F_{i+1} \end{bmatrix},$$

局部上, u_i 和 u_{i+1} 用 1 和 2 对应, 整体上则用 i 和 $i + 1$ 表示, 即

$$\{1, 2\} \text{ (local)} \quad \rightarrow \quad \{i, i + 1\} \text{ (global)},$$

于是可建立如下数组

$$\text{index}(1) = i, \quad \text{index}(2) = i + 1, \quad \text{对第 } i \text{ 个单元},$$

它实现了局部与整体的对应.

装配分两步进行, 即装配单元矩阵和单元向量. 对每个单元, 用 **ke** 表示单元矩阵, **fe** 表示单元向量. 用 **kk** 表示系统矩阵, **ff** 表示系统向量. 设单元矩阵和单元向量如下

$$\mathbf{ke} = \begin{bmatrix} \frac{1}{h_i} + \frac{h_i}{3} & -\frac{1}{h_i} + \frac{h_i}{6} \\ -\frac{1}{h_i} + \frac{h_i}{6} & \frac{1}{h_i} + \frac{h_i}{3} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{fe} = \begin{bmatrix} \frac{h_i}{6}(2x_i + x_{i+1}) \\ \frac{h_i}{6}(2x_{i+1} + x_i) \end{bmatrix} \longleftrightarrow \begin{bmatrix} u_i \\ u_{i+1} \end{bmatrix}.$$

我们先装配单元向量. **fe** 的第一行对应系统的 i , 即 $\text{index}(1) = i$, **fe** 的第二行对应系统的 $i + 1$, 即 $\text{index}(2) = i + 1$. **f** 的第一行应加到 **ff** 的第 i 行, 第二行应加到 **ff** 的第 $i + 1$ 行. 为此可如下编写程序:

```

1 for iel = 1:nel          % 单元循环
2     index = elem(iel,:);% local-->global
3     for i = 1:2           % f 的行循环 (local)
4         ii = index(i);   % f 的行在系统中的编号 (global)
5         ff(ii) = ff(ii)+fe(i); % 把 f 的行放到系统向量的行中
6     end
7 end

```

ke 既涉及到行又涉及到列, 在前面装配 **fe** 的时候实际上已经确定了行, 现在需要确定列. 注意与 u_j 相乘的元素位于第 j 列, 即与指标 **index** 对应.

为此, 装备 **ke** 和 **fe** 的过程可如下编写程序:

```

1 for iel = 1:nel          % 单元循环
2     index = elem(iel,:); % local-->global
3     for i = 1:2           % f 的行循环 (local)
4         ii = index(i);   % f 的行在系统中的编号 (global)
5         ff(ii) = ff(ii)+fe(i); % 把 f 的行放到系统向量的行中
6         for j = 1:2         % k 的列循环 (local)
7             jj = index(j); % k 的列在系统中的编号 (global)

```

```

8         kk(ii,jj) = kk(ii,jj)+ke(i,j);
9         % 把 k 的行列元素放到系统向量的行列中
10        end
11    end
12 end

```

MATLAB 支持矩阵用向量取多行或多列, 因而相加的过程可简单写为

```

1 ff(index) = ff(index)+fe;
2 kk(index,index) = kk(index,index)+ke;

```

这里 $kk(index, index)$ 包含交叉位置的元素. 本文称这种装配策略为指标法, 它的好处在于明确了局部与整体的对应, 便于直接推广. 事实上, 上面的装配程序可以直接平移到高阶有限元以及高维问题中, 只不过要相应修改 $index$ 罢了, 后面将会看到这一点.

上面的装配过程适合逐个单元进行, 即一边计算单元刚度矩阵和载荷向量, 一边进行装配. 一种更高效的装配策略是, 首先计算出所有单元刚度矩阵, 然后用 `sparse` 函数进行一次性装配. 对大规模问题, 后者更好. 尽管前者在一开始可声明为 `sparse` 矩阵, 但一般不提倡对稀疏矩阵进行运算.

3.2.4 sparse 装配法

刚度矩阵的装配

前面给出的装配为

```

1 kk(index, index) = kk(index, index)+ke;

```

它易于理解和推广, 但未充分利用 MATLAB 的向量运算. 事实上, 我们可以把所有的指标对应放在一起实现一次性装配, 本文称为 `sparse` 装配法. 注意, 它只是前面指标装配的再加工.

考虑 (3.4) 给出的单元刚度矩阵. 为了实现一次性装配, 我们要用 k_{ij} 存储所有单元 (i, j) 位置的结果, 这里的 (i, j) 是局部编号, 即

```

1 % ----- All element matrices -----
2 h = diff(node);
3 k11 = -acoef./h+bcoef/2*(-1)+ccoef*h./6*2;
4 k12 = -acoef./h*(-1)+bcoef/2+ccoef*h./6;
5 k21 = -acoef./h*(-1)+bcoef/2*(-1)+ccoef*h./6;
6 k22 = -acoef./h+bcoef/2+ccoef*h./6*2;

```

根据对称性, 上面只需存储上三角部分, 为了一般性, 这里全部存储.

设单元的左端点整体编号为 z_1 , 右端点为 z_2 , 我们要给出所有单元的 local-global 对应, 显然为

```

1 % ----- local --> global -----
2 z1 = elem(:,1); z2 = elem(:,2);

```

且前面给出的第 i_{el} 个单元的装配指标就是

```
index = [z1(iel), z2(iel)].
```

我们可按照下面的方式逐一装配.

```

1 % ----- Assemble the matrix -----
2 % upper triangular
3 kk = sparse(z1,z2,k12,N,N);
4 % lower triangular
5 kk = kk+sparse(z2,z1,k21,N,N);
6 % diagonal
7 kk = kk+sparse(z1,z1,k11,N,N);
8 kk = kk+sparse(z2,z2,k22,N,N);

```

如果是对称矩阵, 那么可如下编写

```

1 kk = sparse(z1,z2,k12,N,N);
2 kk = kk+kk';
3 kk = kk+sparse(z1,z1,k11,N,N);
4 kk = kk+sparse(z2,z2,k22,N,N);

```

这个装配方法比之前的指标法更快一点, 但仍有缺点:

1. 对高维问题, 单元刚度矩阵的分量较多, 逐一相加比较麻烦;
2. `sparse` 函数的快速在于建立稀疏矩阵, 做加减等运算时, 它还是要按稠密矩阵进行计算.

在优化之前, 我们先来分析一下上面的装配.

- 对固定单元, 设单元刚度矩阵为

$$A_K = \begin{array}{cc|c} u_i & u_{i+1} & \\ \hline k_{11} & k_{12} & u_i \\ k_{21} & k_{22} & u_{i+1} \end{array},$$

这里右侧表示整体刚度矩阵的行指标, 上侧表示列指标. 对 k_{12} , 我们要把它放在 $(i, i + 1)$ 位置, 按照前面编程的思路, 是 (z_1, z_2) 位置. 也就是说, 我们要在 (z_1, z_2) 处赋值 k_{12} , 这可用稀疏矩阵函数 `sparse` 完成, 其用法如下

```
S = sparse(i, j, s, m, n);
```

它分配了一个 $m \times n$ 的稀疏零矩阵, 其中 i, j 是向量, 对应分量指出非零值的位置, s 则是非零值的向量. 因此, 若想在 (z_1, z_2) 处赋值 k_{12} , 可以如下操作

```
A = sparse(z1, z2, k12, N, N);
```

注意, 该命令把所有单元刚度矩阵的 $(1,2)$ 处的值放到了整体刚度矩阵的对应位置中.

- 我们自然会有这样的疑问: 如果有两个单元刚度矩阵 $(1,2)$ 处的值对应相同的整体指标 (i, j) , 那么它们应该相加, 而不是简单的赋值.

事实上, 在 MATLAB 中, `sparse` 函数有一个特殊性质 (summation property): 当出现相同指标 (i, j) 时, 规定非零值相加. 这样, 若的确出现上面的情况, 则本身已经解决.

我们要说的是, 对非对角线元素, 上面提到的情形是不可能出现的. 因为 K_i 对应 $\{u_i, u_{i+1}\}$, 只可能出现 $(i, i + 1), (i + 1, i)$, 而对 K_{i+1} 则为 $(i + 1, i + 2), (i + 2, i + 1)$, 两者没有共同位置.

- 上面最后处理对角线元素是防止对称情形转置相加时重复相加对角线元素.

`sparse` 函数的 summation property 使得我们可以进一步优化上面的装配过程, 即把所有位置的 (i, j, s) 拼接在一起实现, 即

$$\begin{bmatrix} i_{11} & j_{11} & s_{11} \\ i_{12} & j_{12} & s_{12} \\ i_{21} & j_{21} & s_{21} \\ i_{22} & j_{22} & s_{22} \end{bmatrix},$$

称其为 sparse 装配指标.

1. 我们按单元刚度矩阵行优先的顺序排列每列的指标;
2. i_{ij} 表示所有单元矩阵 (i, j) 位置的整体编号向量, 共有 `nel` 个元素, 其中 `nel` 是单元的个数;
3. 记上面的矩阵为 $[i, j, s]$, 则 i 共有 $nel \times N_{dof}^2$ 个元素, 其中, $N_{dof} = 2$ 表示单元的自由度个数.

核心代码如下

```
1 % ----- local --> global -----
2 Ndof = 2; nnz = nel*Ndof^2;
3 ii = zeros(nnz,1); jj = zeros(nnz,1); ss = zeros(nnz,1);
4 id = 0;
5 for i = 1:Ndof
6     for j = 1:Ndof
7         ii(id+1:id+nel) = elem(:,i); % zi
8         jj(id+1:id+nel) = elem(:,j); % zj
9         ss(id+1:id+nel) = K(:,i,j); % kij
10        id = id + nel;
11    end
12 end
```

这里假设 (i, j) 位置的单元刚度矩阵值用三维数组存储, 如 iFEM.

注 3.1 关于上面的装配我们做如下评注:

1. `elem` 按行存储单元的好处是可以按列操作同一个顶点.
2. 可用向量法给出 `ii`, `jj`, 考虑到只是简单的赋值, 这里不这样处理, 以体现直观.
3. 我们将采用另一种方式存储单元矩阵, 即按行拉直存储所有单元的结果

$$K = [k_{11}, k_{12}, k_{21}, k_{22}].$$

这里, k_{11} 是所有单元给出的向量, 其他位置类似, 且不妨称 K 为行拉直矩阵. 显然 `ss` 由该矩阵按列拉直得到. **后面将采用这种处理, 为此在生成单元刚度矩阵时, 我们实施行拉直.**

我们可以如下给出装配算法

```
1 % local --> global
2 K = [k11,k12,k21,k22]; % stored in rows
3 Ndof = 2; nnz = nel*Ndof^2;
4 ii = zeros(nnz,1); jj = zeros(nnz,1); ss = zeros(nnz,1);
5 id = 0; s = 1;
6 for i = 1:Ndof
7     for j = 1:Ndof
8         ii(id+1:id+nel) = elem(:,i); % zi
9         jj(id+1:id+nel) = elem(:,j); % zj
```

```

10         ss(id+1:id+nel) = K(:,s);      % kij
11         id = id + nel; s = s+1;
12     end
13 end
14 % stiffness matrix
15 kk = sparse(ii,jj,ss,N,N);

```

或

CODE 3.1. sparse 装配

```

1 % local --> global
2 K = [k11,k12,k21,k22];
3 Ndof = 2; nnz = nel*Ndof^2;
4 ii = zeros(nnz,1); jj = zeros(nnz,1); ss = K(:, );
5 id = 0;
6 for i = 1:Ndof
7     for j = 1:Ndof
8         ii(id+1:id+nel) = elem(:,i); % zi
9         jj(id+1:id+nel) = elem(:,j); % zj
10        id = id + nel;
11    end
12 end
13 % stiffness matrix
14 kk = sparse(ii,jj,ss,N,N);

```

载荷向量的装配

单元载荷向量为

$$[F_K] = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix}, \quad F_i = \int_K f v dx dy, \quad v = \phi_i, \quad i = 1, 2,$$

用中心格式近似有

$$[F^e] = \int_K \begin{bmatrix} f\phi_1 \\ f\phi_2 \end{bmatrix} dx dy \approx \left[\begin{bmatrix} f\phi_1 \\ f\phi_2 \end{bmatrix} \right]_{x_c} \cdot |K| = f(x_c) \cdot \frac{h_i}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

显然有

$$F_1 = F_2 = f(x_c) \cdot \frac{h_i}{2}.$$

按前面逐一装配的方式可如下进行

```

1 % ----- Assemble the vector -----
2 x1 = node(1:N-1); x2 = node(2:N); xc = (x1+x2)./2;
3 fi = f(xc).*h./2;
4 F1 = fi; F2 = fi;
5 ff = sparse(z1,1,F1,N,1);
6 ff = ff+sparse(z2,1,F2,N,1);

```

根据 `sparse` 的 summation property, 最后的两句实际上可直接写为

```

1 ff = sparse([z1;z2],1,[F1;F2],N,1);

```

注意到 $[z_1; z_2] = \text{elem}(:)$, 也可写为

```

1 ff = sparse(elem(:,1,[F1;F2],N,1));

```

`ff` 一般不是稀疏的, 存储为稀疏的形式访问起来会麻烦. 我们可用下面的语句代替

```

1 ff = accumarray(elem(:,[F1;F2],[N 1]));

```

同理, 右端向量也按行拉直存储, 即

```

1 % ----- Assemble the vector -----
2 x1 = node(1:N-1); x2 = node(2:N);
3 xc = (x1+x2)./2;
4 F1 = f(xc).*h./2; F2 = F1; F = [F1,F2];
5 ff = accumarray(elem(:, F(:,[N 1])));

```

`accumarray` 是累加函数, 用法如下.

1. 若 `accumarray` 有两个参数, 则第一个参数是数组的位置索引, 第二个参数是累加的数据. 例如

```

1 subs = [1; 2; 4; 2; 4]; vals = 101:105;
2 A = accumarray(subs, val);

```

`subs` 必须是列向量, 其中的最大数为 4 表明 `A` 是 4 个元素的数组且初始为零数组; 索引 1 对应的值为 101, 则 `A` 的第 1 个位置累加 101; 索引 2 对应的有两个, 分别为 102, 104, 它们累加起来为 206; 索引 3 没有则仍为 0; 索引 4 对应有 103, 105, 累加起来为 208. 于是 `A = [101; 206; 0; 208]`.

特别地, 当 `vals = 2` 为单个数时, 默认为 `vals = vals*ones(max(subs), 1)`, 此时 `A = [2; 4; 0; 4]`.

2. 位置索引可以是矩阵. 例如

```
1 subs = [1 1;
2      2 1;
3      2 3;
4      2 1;
5      2 3];
6 vals = 101:105
7 A = accumarray(subs,vals);
```

subs 列的最大值分别为 2,3, 则 A 是 2×3 的矩阵; subs 的行与 vals 的行对应; subs 的第一行是 (1,1) 表示矩阵的该位置累加 101, 第二行是 (2,1) 表示矩阵的该位置累加 102. 根据这个规律, 我们有 $A = [101 \ 0 \ 0; \ 206 \ 0 \ 208]$.

再考虑三维数组的例子.

```
1 subs = [1 1 1;
2      2 1 2;
3      2 3 2;
4      2 1 2;
5      2 3 2];
6 vals = 101:105;
7 A = accumarray(subs,vals);
```

subs 列的最大值分别为 2,3,3, 则 A 是 $2 \times 3 \times 2$ 的矩阵; 第一行为 (1,1,1), 则矩阵的 (1,1,1) 累加 101, 类似其他行. 这样, 我们有

```
A(:,:,:,1) =
101      0      0
      0      0      0
A(:,:,:,2) =
      0      0      0
206      0     208
```

3. 上面是通过列的最大值来确定矩阵 A 的维数, 我们也可自行设定矩阵的维数. 例如

```
1 subs = [1 1;
2      2 1;
3      2 3;
4      2 1;
```

```

5      2 3];
6  vals = 1;
7 A = accumarray(subs, vals, [2 4]);

```

若没有第三个参数 [2 4] (必须是行向量), 则 A 是 2×3 的矩阵 $[1 \ 0 \ 0; 2 \ 0 \ 2]$. 加上 [2 4], 则是 2×4 的矩阵, 分析一致, 此时结果为 $[1 \ 0 \ 0 \ 0; 2 \ 0 \ 2 \ 0]$.

根据上面的分析, `ff = accumarray(elem(:,), F(:,), [N 1])` 是生成一个 $N \times 1$ 的零向量 ff, 且在 `elem(i)` 的位置累加 `F(i)`.

3.3 程序设计

3.3.1 问题说明

例 3.1 考虑更一般的两点边值问题

$$-au'' + bu' + cu = f(x), \quad 0 < x < L,$$

取精确解为

$$u(x) = \frac{1}{2e}e^{2x} - \frac{1}{2}(1+e^{-1})e^x + \frac{1}{2}.$$

边界条件可以是 Dirichlet 边界条件或 Neumann 边界条件.

变分形式为

$$a(u, v) = \ell(v),$$

其中

$$\begin{aligned} a(u, v) &= \int_0^L (au'v' + bu'v + cuv)dx, \\ \ell(v) &= \int_0^L f(x)v(x)dx + au'v|_0^L. \end{aligned} \tag{3.3}$$

单元刚度矩阵为

$$\begin{aligned} [K^e] &= \int_{x_i}^{x_{i+1}} \left(a \begin{bmatrix} \phi'_1 \\ \phi'_2 \end{bmatrix} [\phi'_1, \phi'_2] + b \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix} [\phi'_1, \phi'_2] + c \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix} [\phi_1, \phi_2] \right) dx \\ &= \frac{a}{h_i} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} + \frac{b}{2} \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} + \frac{ch_i}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}, \end{aligned} \tag{3.4}$$

单元载荷向量为

$$[F^e] = \int_{x_i}^{x_{i+1}} f(x) \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix} dx \approx \frac{f(x_c)h_i}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix},$$

其中 x_c 是单元 $K_i = [x_i, x_{i+1}]$ 的中点, 即 $x_c = (x_i + x_{i+1})/2$.

在后面编程中, 我们主要用到如下的数据信息.

1. 节点编号及坐标

我们将用 `node` 表示所有节点的坐标, `node` 的索引即为节点编号.

2. 连通性

连通性指的是单元的顶点编号, 我们用 `elem1D` 表示, 它的第一列表示所有单元的第一个顶点编号, 第二列是第二个顶点编号. 由连通性立刻可以获得局部与整体对应的装配指标 `index`.

PDE 的数据如下生成.

```
1 function pde = pde1D(para)
2
3 syms x;
4 c1 = 0.5/exp(1); c2 = -0.5*(1+1/exp(1));
5 u = c1*exp(2*x)+c2*exp(x)+1/2;
6 % exact solution
7 uexact = eval(['@(x)',vectorize(u)]); % transform to anonymous ...
8
9 % rhs
10 f = -para.a*diff(u,2)+para.b*diff(u,1)+para.c*u;
11 f = eval(['@(x)',vectorize(f)]);
12
13 % boundary conditions
14 du = diff(u); du = eval(['@(x)',vectorize(du)]);
15 Du = @(x) du(x); g_D = @(x) uexact(x);
16
17 pde = struct('f', f, 'uexact', uexact, 'g_D', g_D, 'Du', Du, ...
    'para', para);
```

3.3.2 刚度矩阵和载荷向量的装配

根据前面的说明, 装配指标如下.

```
1 N = size(node,1); nel = size(elem1D,1); Ndof = 2;
2 % ----- Sparse assembling indices -----
3 nnz = nel*Ndof^2;
4 ii = zeros(nnz,1); jj = zeros(nnz,1);
5 id = 0;
6 for i = 1:Ndof
```

```

7     for j = 1:Ndof
8         ii(id+1:id+nel) = elem1D(:,i);    % zi
9         jj(id+1:id+nel) = elem1D(:,j);    % zj
10        id = id + nel;
11    end
12 end

```

刚度矩阵如下计算和装配.

```

1 % ----- Stiffness matrix -----
2 % All element matrices
3 para = pde.para;
4 a = para.a; b = para.b; c = para.c;
5 h = diff(node);
6 k11 = a./h+b/2*(-1)+c*h./6*2;
7 k12 = a./h*(-1)+b/2+c*h./6;
8 k21 = a./h*(-1)+b/2*(-1)+c*h./6;
9 k22 = a./h+b/2+c*h./6*2;
10 K = [k11,k12,k21,k22]; % stored in rows
11 % stiffness matrix
12 kk = sparse(ii,jj,K(:,N,N));

```

载荷向量为

```

1 % ----- Load vector -----
2 x1 = node(1:N-1); x2 = node(2:N);
3 xc = (x1+x2)./2;
4 F1 = pde.f(xc).*h./2; F2 = F1; F = [F1,F2];
5 ff = accumarray(elem1D(:,1), F(:,1));

```

3.3.3 边界项的处理

下面说明边界项为什么可以最后处理, 我们以一个具体的例子重述前面的过程.

考虑方程

$$-u'' + u = x, \quad 0 < x < 1,$$

这里先不管边界条件. 对应的变分形式为

$$a(u, v) = \ell(v),$$

其中

$$a(u, v) = \int_0^1 (u'v' + uv)dx, \quad \ell(v) = \int_0^1 xvdx + u'|_0^1.$$

设区间划分为 $0 = x_0 < x_1 < \dots < x_n = 1$, 记单元 $K_j = [x_{j-1}, x_j]$, $j = 1, 2, \dots, n$, $h_j = x_j - x_{j-1}$. 其上的插值基函数为(统一记下标为 1,2)

$$\phi_1(x) = \frac{x_j - x}{h_j}, \quad \phi_2(x) = \frac{x - x_{j-1}}{h_j}.$$

变分形式写成单元素累加形式为

$$\sum_{i=1}^n \int_{x_{i-1}}^{x_i} (u'v' + uv)dx = \sum_{i=1}^n \int_{x_{i-1}}^{x_i} xvdx + u'v|_0^1. \quad (3.5)$$

先考虑

$$I = \sum_{i=1}^n \int_{x_{i-1}}^{x_i} (u'v' + uv)dx - \sum_{i=1}^n \int_{x_{i-1}}^{x_i} xvdx,$$

单元 K_i 对应的是

$$I_i = \int_{x_{i-1}}^{x_i} (u'v' + uv)dx - \int_{x_{i-1}}^{x_i} xvdx.$$

把插值近似 $u = u_{i-1}\phi_1 + u_i\phi_2$ 和 $v = \phi_1, \phi_2$ 分别代入上式, 经过简单计算有离散形式

$$\tilde{I}_i = \begin{bmatrix} \frac{1}{h_{i-1}} + \frac{h_{i-1}}{3} & -\frac{1}{h_{i-1}} + \frac{h_{i-1}}{6} \\ -\frac{1}{h_{i-1}} + \frac{h_{i-1}}{6} & \frac{1}{h_{i-1}} + \frac{h_{i-1}}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{i-1} \\ u_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{h_{i-1}}{6}(2x_{i-1} + x_i) \\ \frac{h_{i-1}}{6}(2x_i + x_{i-1}) \end{bmatrix}.$$

若现在只有三个等分单元, 即 $x_0 = 0, x_1 = 1/3, x_2 = 2/3$ 和 $x_3 = 1$, 则对单元 1, 有

$$\tilde{I}_1 = \begin{bmatrix} 3.111 & -2.9444 \\ -2.9444 & 3.111 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0.0185 \\ 0.0370 \end{bmatrix},$$

对单元 2, 有

$$\tilde{I}_2 = \begin{bmatrix} 3.111 & -2.9444 \\ -2.9444 & 3.111 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0.0741 \\ 0.0926 \end{bmatrix},$$

对单元 3, 有

$$\tilde{I}_3 = \begin{bmatrix} 3.111 & -2.9444 \\ -2.9444 & 3.111 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0.1296 \\ 0.1481 \end{bmatrix}.$$

局部到整体的装配, 写出来就是如下的自然扩展: 对单元 1, 有

$$\tilde{I}_1 = \begin{bmatrix} 3.111 & -2.9444 & 0 & 0 \\ -2.9444 & 3.111 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0.0185 \\ 0.0370 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

对单元 2, 有

$$\tilde{I}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3.111 & -2.9444 & 0 \\ 0 & -2.9444 & 3.111 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0.0741 \\ 0.0926 \\ 0 \end{bmatrix},$$

对单元 3, 有

$$\tilde{I}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3.111 & -2.9444 \\ 0 & 0 & -2.9444 & 3.111 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.1296 \\ 0.1481 \end{bmatrix}.$$

三个扩展相加即得需要的整体刚度矩阵和载荷向量

$$\begin{bmatrix} 3.111 & -2.9444 & 0 & 0 \\ -2.9444 & 6.2222 & -2.9444 & 0 \\ 0 & -2.9444 & 6.2222 & -2.9444 \\ 0 & 0 & -2.9444 & 3.1111 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0185 \\ 0.1111 \\ 0.2222 \\ 0.1481 \end{bmatrix}.$$

式 (3.5) 的右端还有积分产生的边界项 $u'v|_0^1$, 现在考察它的贡献. 第 j 个方程是取 $v = \Phi_j$, 因此该方程的右端要加上

$$\begin{aligned} v = \Phi_j : \quad u'v|_0^1 &= u'\Phi_j|_0^1 = u'(1)\Phi_j(x_n) - u'(0)\Phi_j(x_0) \\ &= u'(1)\delta_{jn} - u'(0)\delta_{j0}. \end{aligned}$$

显然只需要在第 0 行加上 $-u'(0)$, 最后一行加上 $u'(1)$, 最终得到

$$\begin{bmatrix} 3.111 & -2.9444 & 0 & 0 \\ -2.9444 & 6.2222 & -2.9444 & 0 \\ 0 & -2.9444 & 6.2222 & -2.9444 \\ 0 & 0 & -2.9444 & 3.1111 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0185 - u'(0) \\ 0.1111 \\ 0.2222 \\ 0.1481 + u'(1) \end{bmatrix}. \quad (3.6)$$

最后考虑边界条件的处理. 若给出的是 Dirichlet 边界条件 $u(0) = u(1) = 0$, 则理论上我们选择的检验函数空间要求 $v(0) = v(1) = 0$, 从而 (3.5) 中的 $u'v|_0^1$ 自动消除. 对非齐次情形可通过边界条件齐次化转化为齐次情形, 但此时方程会发生变化, 变分形式相应地有所改变. 我们真正处理时并不是这样做的, 而是把第一行和最后一行分别用恒等式 $u_0 = u(0)$ 和 $u_n = u(1)$ 代替, 对这里的例子就是

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -2.9444 & 6.2222 & -2.9444 & 0 \\ 0 & -2.9444 & 6.2222 & -2.9444 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u(0) \\ 0.1111 \\ 0.2222 \\ u(1) \end{bmatrix}.$$

这种做法有一个缺点, 就是破坏了矩阵的对称性. 为此可以把已知节点值移到右端

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6.2222 & -2.9444 & 0 \\ 0 & -2.9444 & 6.2222 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u(0) \\ 0.1111 + 2.9444u_0 \\ 0.2222 + 2.9444u_3 \\ u(1) \end{bmatrix},$$

其中 $u_0 = u(0)$, $u_3 = u(1)$. 为了降低矩阵的规模, 可考虑去除恒等的行, 即

$$\begin{bmatrix} 6.2222 & -2.9444 \\ -2.9444 & 6.2222 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1111 + 2.9444u_0 \\ 0.2222 + 2.9444u_3 \end{bmatrix}.$$

以后都采用这种处理. 类似可处理其他边界条件, 例如, 当左边界是 Dirichlet 边界条件, 而右边界是 Neumann 边界条件时, 则只要把 (3.6) 的第一行恒等替换, 而最后一行代入 Neumann 边界值即可.

注 3.2 以后规定: 先处理 Neumann 边界条件, 最后处理 Dirichlet 边界条件. 这一点对高维问题比较重要. 例如对矩形区域, 设上边界为 Neumann, 右边界为 Dirichlet. 若先处理 Dirichlet, 再处理 Neumann, 则右上角的点可能变成未知点 (除非人为记住, 这样没有前者方便).

为了程序的统一, 我们在主程序中给定边界条件信息, 如

```
1 Neumann = []; Dirichlet = [1, N];
2 bdStruct = struct('Dirichlet', Dirichlet, 'Neumann', Neumann);
```

Neumann 边界条件如下处理.

```
1 % ----- Neumann boundary conditions -----
2 Neumann = bdStruct.Neumann;
3 if ~isempty(Neumann)
4     nvec = 1;
5     if find(elemID(:, 1) == Neumann), nvec = -1; end
6     Dnu = pde.Du(node(Neumann, :))*nvec;
7     ff(Neumann) = ff(Neumann) + a*Dnu;
8 end
```

注意, 当 Neumann 为一维单元的左端点时, 外法向量为 -1, 否则为 1.

Dirichlet 边界比较容易, 用恒等式法替换.

```
1 % ----- Dirichlet boundary conditions -----
2 Dirichlet = bdStruct.Dirichlet; g_D = pde.g_D;
```

```

3 isBdNode = false(N,1); isBdNode(Dirichlet) = true;
4 bdNode = (isBdNode); freeNode = (~isBdNode);
5 u = zeros(N,1); u(bdNode) = g_D(node(Dirichlet));
6 ff = ff - kk*u;

```

3.3.4 程序整理

函数文件

总结前面的讨论，我们有如下的函数文件。程序如下

CODE 3.2. FEM1D.m

```

1 function u = FEM1D(node ,elem1D ,pde ,bdStruct)
2
3 N = size(node ,1); nel = size(elem1D ,1); Ndof = 2;
4 % ----- Sparse assembling indices -----
5 nnz = nel*Ndof^2;
6 ii = zeros(nnz ,1); jj = zeros(nnz ,1);
7 id = 0;
8 for i = 1:Ndof
9     for j = 1:Ndof
10         ii(id+1:id+nel) = elem1D(:,i); % zi
11         jj(id+1:id+nel) = elem1D(:,j); % zj
12         id = id + nel;
13     end
14 end
15
16 % ----- Stiffness matrix -----
17 % All element matrices
18 para = pde.para;
19 a = para.a; b = para.b; c = para.c;
20 h = diff(node);
21 k11 = a./h+b/2*(-1)+c*h./6*2;
22 k12 = a./h*(-1)+b/2+c*h./6;
23 k21 = a./h*(-1)+b/2*(-1)+c*h./6;
24 k22 = a./h+b/2+c*h./6*2;
25 K = [k11,k12,k21,k22]; % stored in rows
26 % stiffness matrix
27 kk = sparse(ii,jj,K(:, ) ,N,N);
28

```

```

29 % ----- Load vector -----
30 x1 = node(1:N-1); x2 = node(2:N);
31 xc = (x1+x2)./2;
32 F1 = pde.f(xc).*h./2; F2 = F1; F = [F1,F2];
33 ff = accumarray(elem1D(:,1), F(:,1), [N 1]);
34
35 % ----- Neumann boundary conditions -----
36 Neumann = bdStruct.Neumann;
37 if ~isempty(Neumann)
38     nvec = 1;
39     if find(elem1D(:,1)==Neumann), nvec = -1; end
40     Dnu = pde.Du(node(Neumann,:))*nvec;
41     ff(Neumann) = ff(Neumann) + a*Dnu;
42 end
43
44 % ----- Dirichlet boundary conditions -----
45 Dirichlet = bdStruct.Dirichlet; g_D = pde.g_D;
46 isBdNode = false(N,1); isBdNode(Dirichlet) = true;
47 bdNode = (isBdNode); freeNode = (~isBdNode);
48 u = zeros(N,1); u(bdNode) = g_D(node(Dirichlet));
49 ff = ff - kk*u;
50
51 % ----- Solver -----
52 u(freeNode) = kk(freeNode,freeNode)\ff(freeNode);

```

主程序

主程序如下.

```

1 clc;clear; close all;
2 % ----- Mesh -----
3 a = 0; b = 1;
4 nel = 10; N = nel+1; % numbers of elements and nodes
5 node = linspace(a,b,nel+1)';
6 elem1D = zeros(nel,2); elem1D(:,1) = 1:N-1; elem1D(:,2) = 2:N;
7
8 Neumann = []; Dirichlet = [1,N];
9 bdStruct = struct('Dirichlet', Dirichlet, 'Neumann', Neumann);
10
11 % ----- PDE -----

```

```

12 a = -1; b = 0; c = 0;
13 para = struct('a',a, 'b',b, 'c',c);
14 pde = pde1D(para);
15
16 % ----- FEM1D -----
17 u = FEM1D(node,elem1D,pde, bdStruct);
18
19 % ----- error analysis -----
20 uexact = pde.uexact(node);
21 figure, plot(node,u,'r-',node,uexact,'k--','linewidth',1);
22 xlabel('x'); ylabel('u');
23 legend('Numerical solution','Exact solution')
24 Err = u-uexact;
25 figure, plot(node,Err,'linewidth',1); legend('Absolute error');

```

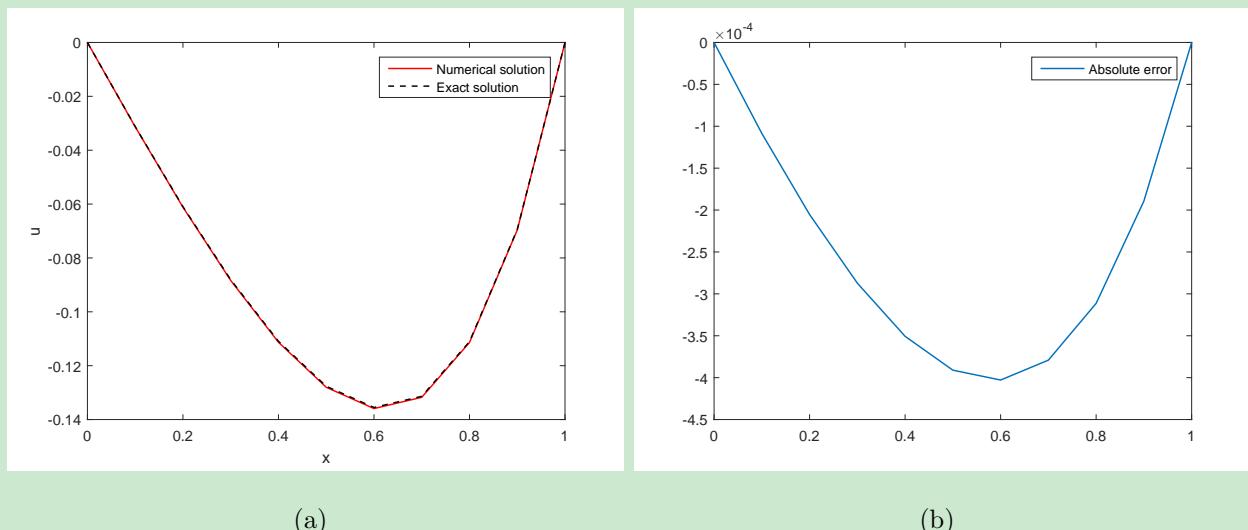
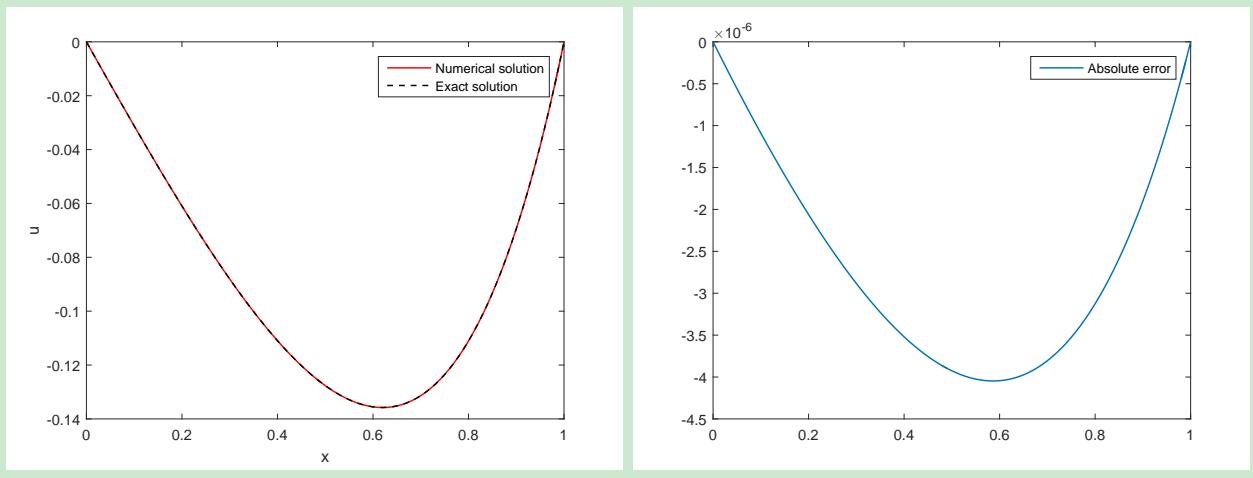


图 3.4. (a) 数值解和精确解; (b) 绝对误差 ($n = 10$)



(a)

(b)

图 3.5. (a) 数值解和精确解; (b) 绝对误差 ($n = 100$)

第四章 二维问题的有限元方法

从本章开始, 我们把主要精力放在二维问题上. 我们将会发现, 一维问题的处理策略, 可以容易地平移到二维问题上, 这也是本章需要实现的目标.

有限元编程可以归结为三步:

- 对区域进行剖分, 存储需要的网格数据;
- 计算单元刚度矩阵和载荷向量, 并装配;
- 计算代数方程组.

本章只考虑前两步.

4.1 一些说明

4.1.1 问题描述与网格数据

为了简单, 考虑 Poisson 问题

$$\begin{cases} -\Delta u = f & \text{in } \Omega, \\ u = g_D & \text{on } \Gamma_D, \\ \frac{\partial u}{\partial n} = g_N & \text{on } \Gamma_N. \end{cases} \quad (4.1)$$

计算中取精确解为

$$u(x, y) = y^2 \sin(\pi x).$$

区域及剖分如下图所示, 且假设右边界是 Neumann 边界条件, 其他为 Dirichlet 边界条件.

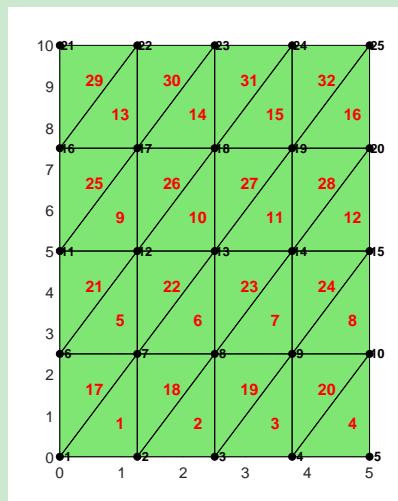


图 4.1. 矩形区域的标准三角剖分 (红色数字为单元编号)

不考虑边界条件, (4.1) 对应的变分形式为

$$\int_{\Omega} \nabla u \cdot \nabla v \, dx dy - \int_{\partial\Omega} v \frac{\partial u}{\partial n} \, dx dy = \int_{\Omega} f(x, y) \, dx dy.$$

如同一维问题, 我们最后考虑边界条件和边界积分

$$-\int_{\partial\Omega} v \frac{\partial u}{\partial n} \, dx dy.$$

如图 4.1, 矩形区域用标准三角形进行剖分, 红色数字表示单元编号, 黑色数字表示节点编号. 我们需要给出节点坐标、连通性以及局部整体编号关系等信息, 下面逐一考虑.

节点坐标

在编程中我们需要每个节点的坐标, 用 `node` 记录, 它是两列的一个矩阵, 第一列表示各节点的横坐标, 第二列表示各节点的纵坐标, 行的索引号对应节点的整体编号.

连通性

我们还要给出每个单元连通的顶点, 这里用 `elem` 表示 (每行对应一个单元), 如第 1 个单元连通的节点是 1, 2, 7, 有

```
1 elem(1,1)=1; elem(1,2)=2; elem(1,3)=7; % 第 1 个单元
```

局部整体对应

对每个单元三角形, 局部编号都是 1, 2, 3 (按逆时针方向). 如同一维问题, 在指标编程法中, 我们用 `index` 定位相应的整体编号. 例如, 对单元 ①, 可给出如下的局部整体对应

$$\{1, 2, 3\} \text{ (local)} \quad \rightarrow \quad \{1, 2, 7\} \text{ (global)},$$

这样对该单元有

```
index(1)= 1; index(2)= 2; index(3)= 7;
```

在连通性中我们已经获得了每个单元的顶点标号 (逆时针), 对单元 `iel`, 有

```
index = elem(iel,:);
```

剖分图 4.1 的 `node`, `elem` 可用如下函数生成 (参考 iFEM)

CODE 4.1. squaremesh.m

```
1 function [node,elem] = squaremesh(square,h1,h2)
2 %% SQUAREMESH uniform mesh of a square
3 %
```

```

4 % square = [a1,b1,a2,b2] for rectangle [a1,b1]*[a2,b2]
5 %
6 if nargin == 2, h2 = h1; end
7
8 % ----- Generate nodes -----
9 a1 = square(1); b1 = square(2); a2 = square(3); b2 = square(4);
10 [x,y] = ndgrid(a1:h1:b1,a2:h2:b2);
11 node = [x(:),y(:)];
12
13 % ----- Generate elements -----
14 nx = size(x,1); ny = size(y,2); % number of columns and rows
15
16 % 4 k+nx --- k+1+nx 3
17 % | | |
18 % 1 k --- k+1 2
19
20 % indices of k
21 N = size(node,1);
22 k = (1:N-nx)'; cut = nx*(1:ny-1); k(cut) = [];
23
24 elem = [k+1 k+1+nx k; k+nx k k+1+nx];

```

有了 node 和 elem, 我们就可以画出剖分图 4.1:

```
showmesh(node,elem); findnode(node); findelem(node,elem);
```

节 2.4 给出了边界设置函数 setboundary.m, 如下获取 Neumann 和 Dirichlet 边界.

```

1 % ----- Mesh and boundary conditions -----
2 a1 = 0; b1 = 1; a2 = 0; b2 = 1;
3 Nx = 10; Ny = 10; h1 = (b1-a1)/Nx; h2 = (b2-a2)/Ny;
4 [node,elem] = squaremesh([a1 b1 a2 b2],h1,h2);
5
6 bdNeumann = 'abs(x-1)<1e-4'; % string for Neumann
7 bdStruct = setboundary(node,elem,bdNeumann);

```

这里,

- bdStruct 是结构体, 包含了各种边界信息.
- eD = bdStruct.eD 记录的是不重复的 Dirichlet 边界节点编号.
- elemN = bdStruct.elemN 记录的是 Neumann 边界单元, 即小区间的起点和终点编

号.

- Neumann 边界之所以按一维的 elem 记录, 是因为 Neumann 条件可视为一维的装配问题, 后面将会看到.

4.1.2 二维问题的装配

指标装配法

节 3.2 给出了一维问题刚度矩阵和载荷向量的装配算法, 其实对二维以及更高维问题, 该算法同样适用. 下面用一个例子来说明.

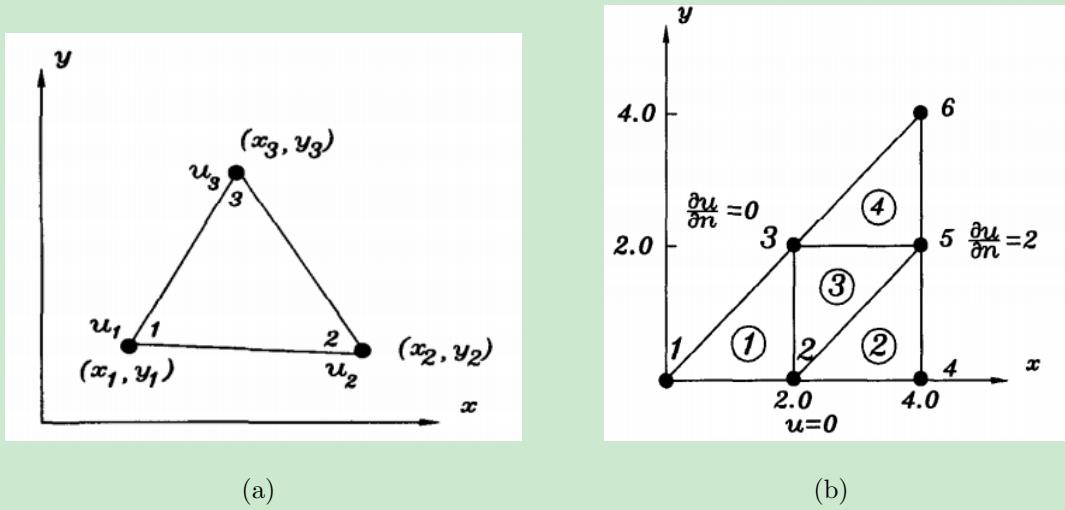


图 4.2. 单元剖分 (右图的圈表示单元编号)

以图 4.2 (b) 的剖分为例说明. 不考虑边界项, 变分形式的左端为

$$a(u, v) = \int_{\Omega} (u_x v_x + u_y v_y) dx dy.$$

为了方便, 考虑线性 Lagrange 有限元. 如图 4.2 (a), 单元上的线性插值为

$$u = \phi_1(x, y)u_1 + \phi_2(x, y)u_2 + \phi_3(x, y)u_3,$$

其中

$$\phi_1 = \frac{1}{2S} [(x_2 y_3 - x_3 y_2) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y],$$

$$\phi_2 = \frac{1}{2S} [(x_3 y_1 - x_1 y_3) + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)y],$$

$$\phi_3 = \frac{1}{2S} [(x_1 y_2 - x_2 y_1) + (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y],$$

满足

$$S = \frac{1}{2} \det \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}, \quad \phi_i(z_j) = \delta_{ij}, \quad \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = 1.$$

注意到线性基函数求导后为常数, 对 $u = \phi_1 u_1 + \phi_2 u_2 + \phi_3 u_3$, 逐个代入 $v = \phi_j$, $j = 1, 2, 3$

易得单元刚度矩阵为

$$[K^e] = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix},$$

这里

$$\begin{aligned} k_{11} &= \frac{1}{4S} [(x_3 - x_2)^2 + (y_2 - y_3)^2], \\ k_{12} = k_{21} &= \frac{1}{4S} [(x_3 - x_2)(x_1 - x_3) + (y_2 - y_3)(y_3 - y_1)], \\ k_{13} = k_{31} &= \frac{1}{4S} [(x_3 - x_2)(x_2 - x_1) + (y_2 - y_3)(y_1 - y_2)], \\ k_{22} &= \frac{1}{4S} [(x_1 - x_3)^2 + (y_3 - y_1)^2], \\ k_{23} = k_{32} &= \frac{1}{4S} [(x_1 - x_3)(x_2 - x_1) + (y_3 - y_1)(y_1 - y_2)], \\ k_{33} &= \frac{1}{4S} [(x_2 - x_1)^2 + (y_1 - y_2)^2]. \end{aligned}$$

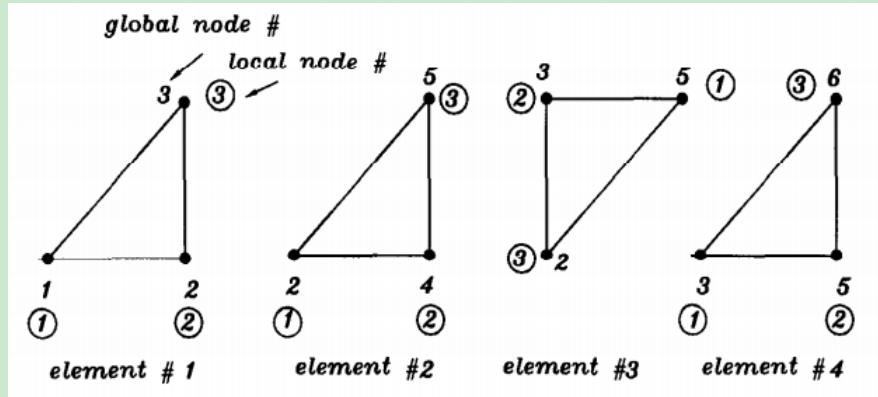


图 4.3. 局部与整体编号 (圈是局部标号)

若图 4.2 (b) 中的四个单元三角形都按图 4.3 进行局部编号 (四个单元的局部编号用带圈数字表示), 则每个单元的刚度矩阵都是

$$[K^e] = \begin{bmatrix} 0.5 & -0.5 & 0.0 \\ -0.5 & 1.0 & -0.5 \\ 0.0 & -0.5 & 0.5 \end{bmatrix}.$$

按照整体排序, 我们有 (原来在哪行, 还是应该在那行)

1. *element #1*

$$\begin{bmatrix} 0.5 & -0.5 & 0.0 \\ -0.5 & 1.0 & -0.5 \\ 0.0 & -0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 0.5 & -0.5 & 0.0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.5 & 1.0 & -0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0 & -0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \end{bmatrix}$$

2. *element #2*

$$\begin{bmatrix} 0.5 & -0.5 & 0.0 \\ -0.5 & 1.0 & -0.5 \\ 0.0 & -0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_2 \\ u_4 \\ u_5 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & -0.5 & 0.0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.5 & 0 & 1.0 & -0.5 & 0 \\ 0 & 0.0 & 0 & -0.5 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \end{bmatrix}$$

3. *element #3*

$$\begin{bmatrix} 0.5 & -0.5 & 0.0 \\ -0.5 & 1.0 & -0.5 \\ 0.0 & -0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_5 \\ u_3 \\ u_2 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & -0.5 & 0 & 0.0 & 0 \\ 0 & -0.5 & 1.0 & 0 & -0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0 & -0.5 & 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \end{bmatrix}$$

4. *element #4*

$$\begin{bmatrix} 0.5 & -0.5 & 0.0 \\ -0.5 & 1.0 & -0.5 \\ 0.0 & -0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_3 \\ u_5 \\ u_6 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0 & -0.5 & 0.0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.5 & 0 & 1.0 & -0.5 \\ 0 & 0 & 0.0 & 0 & -0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \end{bmatrix}$$

相加后我们就把单元刚度矩阵装配成整体刚度矩阵.

可以看到上面的处理与一维问题没有什么区别, 只是扩展时变量个数更多罢了. 显然只要给出局部编号与整体编号的关系向量 `index`, 就可按一维的算法合成整体刚度矩阵及载荷向量, 即如下进行

```

1 N = size(node,1); NT = size(elem,1);
2 kk = zeros(N,N); ff = zeros(N,1);
3 for iel = 1:NT
4     % local --> global
5     index = elem(iel,:);
6     % assemble
7     kk(index,index) = kk(index,index)+ke;
8     ff(index) = ff(index)+fe;
9 end
10 kk = sparse(kk);

```

这里, ke 和 fe 是单元循环过程中产生的刚度矩阵和载荷向量. 指标装配不是高效的方法, 后面不再给出详细的程序.

sparse 装配法

与 CODE 3.1 一样, 我们可以给出 sparse 装配指标 (把所有自由度想象成一维问题的点), 只要把 $Ndof = 2$ 改为 $Ndof=3$, 即

CODE 4.2. sparse 装配指标

```

1 % local --> global
2 nnz = NT*Ndof^2;
3 ii = zeros(nnz,1); jj = zeros(nnz,1);
4 id = 0;
5 for i = 1:Ndof
6     for j = 1:Ndof
7         ii(id+1:id+NT) = elem(:,i);    % zi
8         jj(id+1:id+NT) = elem(:,j);    % zj
9         id = id + NT;
10    end
11 end

```

单元刚度矩阵要按照如下方式排列

```

1 K = [k11,k12,k13,k21,k22,k23,k31,k32,k33];

```

即按行拉直每个单元刚度矩阵, 并逐行排列单元, 从而 K 的第 1 列为所有单元的 k_{11} , 依次类推. 这样, 刚度矩阵如下装配

```

1 ss = K(:,);
2 kk = sparse(ii,jj,ss,N,N);

```

单元载荷向量如下排列

```

1 F = [f1,f2,f3];

```

这里, f_i 是所有单元的. 如下装配

```

1 ff = accumarray(elem(:,), F(:,), [N 1]);

```

4.2 Poisson 方程的一阶有限元方法

4.2.1 刚度矩阵的计算

单元变分形式为

$$a_K(u, v) = \int_K \nabla u \cdot \nabla v \, dx \, dy,$$

设局部节点基为 ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 , 则有

$$A_K = (a_K(\phi_j, \phi_i))_{3 \times 3}.$$

对线性元, $\phi_i(x, y) = \lambda_i(x, y)$ 就是面积坐标函数. 设 i, j, k 表示 1,2,3 的轮换. 定义

$$\xi_i = x_j - x_k, \quad \eta_i = y_j - y_k, \quad \omega_i = x_j y_k - x_k y_j,$$

则三角形的有向面积可表示为

$$S = \frac{1}{2} \det \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} (\xi_1 \eta_2 - \xi_2 \eta_1) = \omega_1 \omega_2 \omega_3,$$

且

$$\lambda_i(x, y) = \frac{1}{2S} (\eta_i x - \xi_i y + \omega_i), \quad i = 1, 2, 3. \quad (4.2)$$

从 (x, y) 到 (λ_1, λ_2) 变换的 Jacobi 矩阵的行列式为

$$|J| = \det \frac{\partial(\lambda_1, \lambda_2)}{\partial(x, y)} = \frac{1}{2S},$$

且有

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial x} = \frac{\eta_i}{2S}, \quad \frac{\partial \lambda_i}{\partial y} = -\frac{\xi_i}{2S}, \quad i = 1, 2, 3.$$

显然 λ_i 的导数是常数, 于是

$$\int_K \nabla \phi_j \cdot \nabla \phi_i \, dx \, dy = \nabla \phi_j \cdot \nabla \phi_i \cdot |K|,$$

为此需要计算基函数的导数和面积. 我们用三维数组 Dphi 存储三个基函数的导数, 如下

```

1 function [Dphi,area] = gradbasis(node,elem)
2
3 z1 = node(elem(:,1),:);
4 z2 = node(elem(:,2),:);
5 z3 = node(elem(:,3),:);
6 e1 = z2-z3; e2 = z3-z1; e3 = z1-z2;
7 area = 0.5*(-e3(:,1).*e2(:,2)+e3(:,2).*e2(:,1));
8
9 grad1 = [e1(:,2), -e1(:,1)]./(2*area); % stored in rows
10 grad2 = [e2(:,2), -e2(:,1)]./(2*area);
11 grad3 = -(grad1+grad2);
12
13 NT = size(elem,1);
14 Dphi(1:NT,:,:1) = grad1;
15 Dphi(1:NT,:,:2) = grad2;
16 Dphi(1:NT,:,:3) = grad3;

```

这里, grad1 每行对应一个单元. 刚度矩阵如下一次性计算

```

1 K = zeros(NT,Ndof^2);
2 s = 1;
3 for i = 1:Ndof
4     for j = 1:Ndof
5         K(:,s) = sum(Dphi(:,:,i).*Dphi(:,:,j),2).*area;
6         s = s+1;
7     end
8 end

```

这里, $Dphi(:,:,i) \cdot Dphi(:,:,j)$ 是横坐标点乘横坐标, 纵坐标点乘纵坐标给出的向量, 按行求和就是 $\nabla\phi_j \cdot \nabla\phi_i$.

注 4.1 较新版本的 MATLAB, 如 MATLAB 2018 支向量与矩阵的点乘. 设 $A = (a_{ij})$ 为 $m \times n$ 的矩阵, $b = (b_i)$ 是 m 维的列向量, 则

- $A.*b$ 与 $b.*A$ 相同, 都为 $(b_i a_{ij})_{m \times n}$, 即行之间相乘.
- $A./b$ 为 $(a_{ij}/b_i)_{m \times n}$, $b./A$ 为 $(b_i/a_{ij})_{m \times n}$, 都是行之间相除.

这样, 第二个循环也可去掉, 如下

```

1 K = zeros(NT,Ndof^2);

```

```

2 for i = 1:Ndof
3     j = 1:Ndof;      jd = (i-1)*Ndof+1:i*Ndof;
4     K(:,jd) = sum(Dphi(:,:,i).*Dphi(:,:,j),2).*area;
5 end
6 kk = sparse(ii,jj,K(:,N,N));

```

不过，在后面的程序中我们还是尽量避免这种运算（所有程序确保在 MATLAB 2015 上可执行）。

4.2.2 载荷向量的计算

载荷向量的积分可用中心格式近似

$$F_K = \int_K \begin{bmatrix} f\phi_1 \\ f\phi_2 \\ f\phi_3 \end{bmatrix} dx dy \approx \begin{bmatrix} f\lambda_1 \\ f\lambda_2 \\ f\lambda_3 \end{bmatrix}_{(x_c, y_c)} \cdot |K| = f(x_c, y_c) \cdot \frac{|K|}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix},$$

其中 $f(x_c, y_c)$ 是在单元重心处的值。如下计算载荷向量

```

1 % coordinates of all triangles
2 x1 = node(elem(:,1),1); y1 = node(elem(:,1),2);
3 x2 = node(elem(:,2),1); y2 = node(elem(:,2),2);
4 x3 = node(elem(:,3),1); y3 = node(elem(:,3),2);
5 % load vector
6 xc = 1/3*(x1+x2+x3); yc = 1/3*(y1+y2+y3); pc = [xc,yc];
7 f1 = f(pc).*area./3; f2 = f1; f3 = f1;
8 F = [f1,f2,f3];
9 ff = accumarray(elem(:,1), F(:,1), [N 1]);

```

这里数据文件给出了函数 f ，它是按整体坐标给的，即 $f = f(p)$, $p = (x, y)$.

也可用三角形上的 Gauss 求积公式。iFEM 中提供了三角形上的 Gauss 求积节点与权重，即 quadpts.m。我们简单说明一下其用法。实际上，那里的权重和节点是针对面积坐标下的参考三角形 \hat{T} 进行的，积分公式为

$$\iint_{\hat{T}} f(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) d\hat{\sigma} \approx |\hat{T}| \sum_{p=1}^{n_g} w_p f(\lambda_{1,p}, \lambda_{2,p}, \lambda_{3,p}), \quad |\hat{T}| = \frac{1}{2},$$

其中，

$$\begin{cases} x = x_1\lambda_1 + x_2\lambda_2 + x_3\lambda_3 \\ y = y_1\lambda_1 + y_2\lambda_2 + y_3\lambda_3 \end{cases}, \quad \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1, \quad (4.3)$$

注意到

$$\det \left(\frac{\partial(x, y)}{\partial(\lambda_1, \lambda_2)} \right) = 2S,$$

这里 S 是三角形 T 的代数面积, 我们有

$$\int_T F(x, y) d\sigma = 2|T| \int_{\hat{T}} f(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) d\hat{\sigma} = |T| \sum_{p=1}^{n_g} w_p f(\lambda_{1,p}, \lambda_{2,p}, \lambda_{3,p}).$$

因变换前后点处的值不变, 故

$$\int_T F(x, y) d\sigma = |T| \sum_{p=1}^{n_g} w_p F(x_p, y_p). \quad (4.4)$$

利用 (9.3) 可把参考元上的 Gauss 点 $(\lambda_{1,p}, \lambda_{2,p}, \lambda_{3,p})$ 转化为 T 上的点.

```

1 % n: n-th order quadrature rule
2 f = pde.f;
3 [lambda, weight] = quadpts(2); % n = 2
4 f1 = zeros(NT,1); f2 = f1; f3 = f1;
5 for iel = 1:NT
6     vK = node(elem(iel,:)); % vertices of K
7     pxy = lambda*vK; fxy = f(pxy);
8     fv1 = fxy.*lambda(:,1); % (f, phi1)
9     fv2 = fxy.*lambda(:,2); % (f, phi2)
10    fv3 = fxy.*lambda(:,3); % (f, phi3)
11
12    f1(iel,:) = area(iel)*weight*fv1;
13    f2(iel,:) = area(iel)*weight*fv2;
14    f3(iel,:) = area(iel)*weight*fv3;
15 end
16 F = [f1,f2,f3];
17 ff = accumarray(elem(:), F(:,[N 1]));

```

注意, `lambda` 共有 3 列, 第 i 列对应 λ_i , 该列数组就是对应的积分点, 而 `weight` 是行向量. 也可直接用向量化运算

```

1 % Gauss quadrature rule
2 [lambda, weight] = quadpts(2);
3 F = zeros(NT,3);
4 for iel = 1:NT
5     vK = node(elem(iel,:)); % vertices of K
6     pxy = lambda*vK; fxy = f(pxy);
7     fv = fxy.*lambda;
8     F(iel,:) = area(iel)*weight*fv;
9 end
10 ff = accumarray(elem(:), F(:,[N 1]));

```

上面可继续优化. 有限元计算过程中要尽量避免单元循环, 而以向量化代替. 前面是把(4.4)的和向量化运算, 但更理想的方式是先计算出求和中的每一项, 再把和项相加. 为此, 我们要给出所有单元的 pxy. 第 p 个和项的所有 pxy 如下

```

1 % quadrature points in the x-y coordinate
2 pxy = lambda(p,1)*node(elem(:,1),:) ...
3     + lambda(p,2)*node(elem(:,2),:) ...
4     + lambda(p,3)*node(elem(:,3),:);

```

从而积分如下计算

```

1 F = zeros(NT,3);
2 for p = 1:size(lambda,1)
3     % quadrature points in the x-y coordinate
4     pxy = lambda(p,1)*node(elem(:,1),:) ...
5         + lambda(p,2)*node(elem(:,2),:) ...
6         + lambda(p,3)*node(elem(:,3),:);
7     fxy = f(pxy); fv = fxy*lambda(p,:);
8     F = F + weight(p)*fv;
9 end
10 F = area.*F;
11 ff = accumarray(elem(:), F(:), [N 1]);

```

注 4.2 需要注意的是, 对常函数 $f(x,y) = 1$, 调用匿名函数 $f = @(x,y) 1$ 时, 多个点只会生成一个值, 此时必须改为 $f = @(x,y) 1 * ones(size(x))$ 或 $f = @(x,y) 1 + 0*x$ (编写函数时也要注意).

4.2.3 边界条件的处理

先考虑 Neumann 边界条件, 即边界积分项.

等效拉平法

设区域 Ω 割分后所得区域为 Ω_h , 变分问题实际上是在 Ω_h 上考虑.

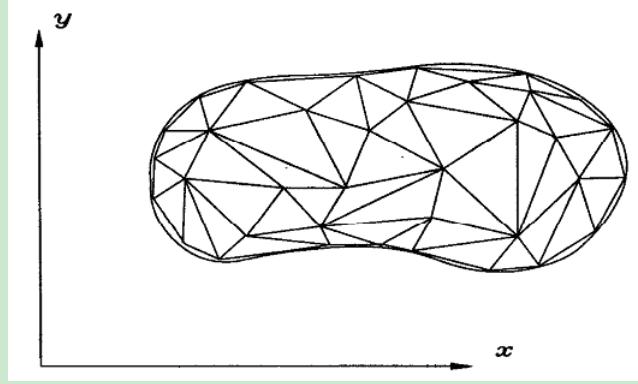


图 4.4. 区域剖分

在不考虑边界条件情况下, 整体变分形式为

$$\int_{\Omega_h} \nabla u \cdot \nabla v dx dy = \int_{\Omega_h} f v dx dy + \int_{\partial\Omega_h} \frac{\partial u}{\partial n} v ds \quad \forall v \in V_h.$$

注意, 前面装配给出的是不考虑边界积分的部分, 即

$$\int_{\Omega_h} \nabla u \cdot \nabla v dx dy \sim \int_{\Omega_h} f v dx dy \quad \forall v \in V_h,$$

我们还需要加上边界积分

$$\int_{\partial\Omega_h} \frac{\partial u}{\partial n} v ds$$

的贡献. 设边界 $\partial\Omega_h = e_1 \cup e_2 \cup \dots \cup e_l$, 则

$$\int_{\partial\Omega_h} \frac{\partial u}{\partial n} v ds = \sum_i \int_{e_i} \frac{\partial u}{\partial n} v ds, \tag{4.5}$$

这里边界项 $\int_{e_i} \frac{\partial u}{\partial n} v ds$ 相当于一维问题的 $u'v|_{x_{i-1}}^{x_i}$, 而 $\int_{\partial\Omega} \frac{\partial u}{\partial n} v ds$ 相当于 $u'v|_0^1$ (见式 (3.5)).

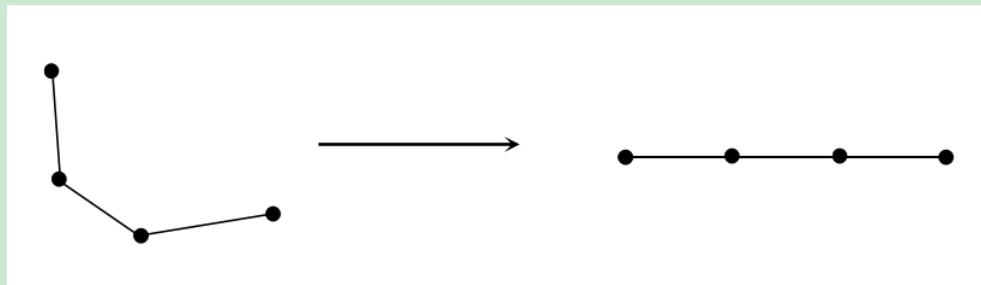


图 4.5. 边界“拉平”

值得注意的是, 若把 $\partial\Omega_h$ “拉平” (想象成一条直线), 则边界上的积分就相当于一维问题的有限元积分, 这是我们处理高维问题的重要观察. 事实上, 设整体变量排列为 u_1, u_2, \dots, u_M , 则有相应的整体节点基为 $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_M$, 满足 $\Phi_j(x_i) = \delta_{ij}$ (x_i 是整体节点). 不妨设前 l 个为全部边界点, 则

$$\Psi_j = \Phi_j|_{\partial\Omega_h}, \quad j = 1, 2, \dots, l$$

相当于“拉平”边界对应的整体节点基(一维问题),因为它满足节点基的定义. 而 Ψ_j 限制在边界单元上就会产生类似一维问题的局部节点基 ϕ_1, ϕ_2 .

这样,对(4.5)就可以类似一维问题那样分单元装配载荷向量.

4.2.4 边界积分的装配

方程组右端的第 j 行要加上

$$v = \Phi_j : \int_{\partial\Omega_h} \frac{\partial u}{\partial n} v ds = \sum_i \int_{e_i} \frac{\partial u}{\partial n} v ds,$$

前面已经分析了它可以类似一维问题处理,下面具体讨论之.

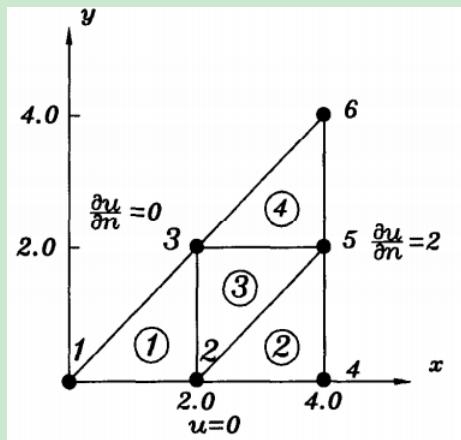


图 4.6. 单元剖分(圈表示单元编号)

为了方便,我们用图 4.6 的区域剖分来说明边界积分的影响,这里边界条件包含 Dirichlet 边界条件和 Neumann 边界条件.

- 先看 Neumann 边界 4-5, 记为 Γ^{45} , 计算 $\int_{\Gamma^{45}} \frac{\partial u}{\partial n} v ds$.

此时通量 $\frac{\partial u}{\partial n} = g_N$ 已知,从而积分可以具体算出,需要把算出的值放到方程的右端(载荷向量中). 单元为 $[x_4, x_5]$, 我们有局部整体对应

$$\{1, 2\} \text{ (local)} \quad \rightarrow \quad \{4, 5\} \text{ (global)},$$

从而单元积分应贡献的行如下

$$\begin{bmatrix} \int_{\Gamma^{45}} g_N \phi_1 ds \\ \int_{\Gamma^{45}} g_N \phi_2 ds \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} F_4 \\ F_5 \end{bmatrix},$$

其中 ϕ_1, ϕ_2 是局部节点基. 令指标

`index(1)= 4; index(2)= 5;`

则可利用载荷向量的装配算法计算. 对 Γ^{56} 类似处理.

- 再看 Dirichlet 边界 1-2, 记为 Γ^{12} .

本来是需要计算积分 $\int_{\Gamma^{12}} \frac{\partial u}{\partial n} v ds$, 此时 $\frac{\partial u}{\partial n}$ 并不知道. 若要计算该积分, 则它产生的是关于 u_1, u_2 的结果, 因而是变量, 需要合并到左侧的刚度矩阵中, 而不是右侧. 但是, u_1, u_2 的值是已知的, 它们对应的行最后都会用恒等式 $u_1 = u(x_1)$ 和 $u_2 = u(x_2)$ 替换, 所以没有必要计算积分.

根据以上分析, 可以给出如下的编程策略.

二维问题的有限元编程策略

- (1) 不考虑边界条件或边界积分项, 按 4.1.2 节求出暂时的整体刚度矩阵和整体载荷向量.
 - (2) 确定 Neumann 边界, 如图 4.6 的 4-5-6 部分, 把这部分边界视为一维问题的整体区域, $\frac{\partial u}{\partial n} = g_N$ 视为一维问题的载荷 f , 从而给出“边界单元载荷向量”, 然后加到整体载荷向量的对应位置上 (若 $g_N = 0$, 则贡献为 0, 直接忽略).
 - (3) 确定 Dirichlet 边界, 用“恒等式法”取代对应边界点的系统方程的行 (一般去除 Dirichlet 节点“变量”).
-

注 4.3 必须等所有装配过程完成后才能应用 Dirichlet 边界条件, 而 Neumann 边界条件本身是装配问题, 所以必须先处理 Neumann 边界条件, 最后处理 Dirichlet 边界条件.

注 4.4 Neumann 边界对应边界积分, 它可以逐段积分, 而且与积分单元的次序无关, 只要保证每个单元的定向正确即可.

边界单元的积分计算

我们用梯形公式近似 (或用中心格式)

$$\int_{\Gamma^e} \frac{\partial u}{\partial n} \phi_1 ds = \frac{h_e}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial n}(z_1) \phi_1(z_1) + \frac{\partial u}{\partial n}(z_2) \phi_1(z_2) \right) = \frac{h_e}{2} \frac{\partial u}{\partial n}(z_1),$$

$$\int_{\Gamma^e} \frac{\partial u}{\partial n} \phi_2 ds = \frac{h_e}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial n}(z_1) \phi_2(z_1) + \frac{\partial u}{\partial n}(z_2) \phi_2(z_2) \right) = \frac{h_e}{2} \frac{\partial u}{\partial n}(z_2),$$

其中

$$h_e = |z_j - z_i| = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}.$$

注意 h_e 是单元长度而不是代数长度, 这是因为边界积分可以看成拉平后的一维积分, 因是逆时针排列, 故拉平后是从左到右, 因而是单元长度.

注意到

$$h_e \frac{\partial u}{\partial n} = h_e \nabla u \cdot \vec{n} = \nabla u \cdot (h_e \vec{n}),$$

而 $\hat{n}_e = h_e \vec{n}$ 可通过三角形的定向边逆时针旋转 90° 获得 (绕着定向边的终点), 即

```
1 z1 = node(elemN(:,1),:); z2 = node(elemN(:,2),:);
2 e = z1-z2; % e = z2-z1
3 ne = [-e(:,2),e(:,1)]; % scaled ne
```

注意, setboundary.m 函数给出的边界边已经定向过.

边界条件的程序实现

Neumann 边界条件可视为一维问题载荷向量的装配, 为此要给出 Neumann 边界单元“拉平”后从左至右的节点编号 (这里的从左到右意思是按逆时针方向给出的). 前面已经给出, 为 elemN.

Neumann 边界条件可如下快速装配

```
1 % ----- Neumann boundary conditions -----
2 elemN = bdStruct.elemN;
3 if ~isempty(elemN)
4     z1 = node(elemN(:,1),:); z2 = node(elemN(:,2),:);
5     e = z1-z2; % e = z2-z1
6     ne = [-e(:,2),e(:,1)]; % scaled ne
7     Du = pde.Du;
8     gradu1 = Du(z1); gradu2 = Du(z2);
9     F1 = sum(ne.*gradu1,2)/2; F2 = sum(ne.*gradu2,2)/2;
10    FN = [F1,F2];
11    ff = ff + accumarray(elemN(:,1), FN(:,1));
12 end
```

我们总假设有 Dirichlet 边界条件, 类似一维问题处理

```
1 % ----- Dirichlet boundary conditions -----
2 eD = bdStruct.eD; g_D = pde.g_D;
3 isBdNode = false(N,1); isBdNode(eD) = true;
4 bdNode = find(isBdNode); freeNode = find(~isBdNode);
5 pD = node(bdNode,:);
6 u = zeros(N,1); u(bdNode) = g_D(pD);
7 ff = ff - kk*u;
```

最后的方程组可如下求解

```
1 u(freeNode) = kk(freeNode,freeNode)\ff(freeNode);
```

MATLAB 早期版本, 例如 MATLAB R2013a 可以用如下语句画图

```
1 p = node'; t = elem';
2 figure, pdesurf(p,t,u);
```

内部主要使用 pdeplot 画图的. 新版本有所改动, 已不支持上面的方式, 这是因为, MATLAB 网格数据中连通性 t 还有额外的信息. 前面给出了 showsolution.m, 它使用 patch 画图, 用法如下:

```
figure, showsolution(node,elem,u);
```

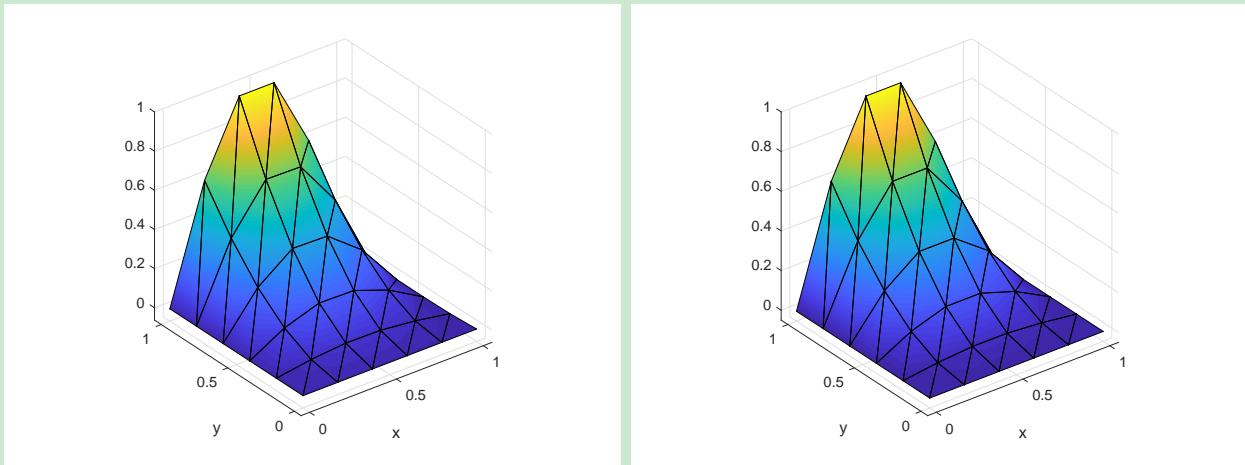


图 4.7. 模型问题的数值解与精确解

为了便于对比, 这里对画图的区域做了界定, 特别是 z 轴方向. 如果想去掉这些界定, 例如画绝对误差图, 那么可在画图语句后添加 `zlim('auto')`, 如下图

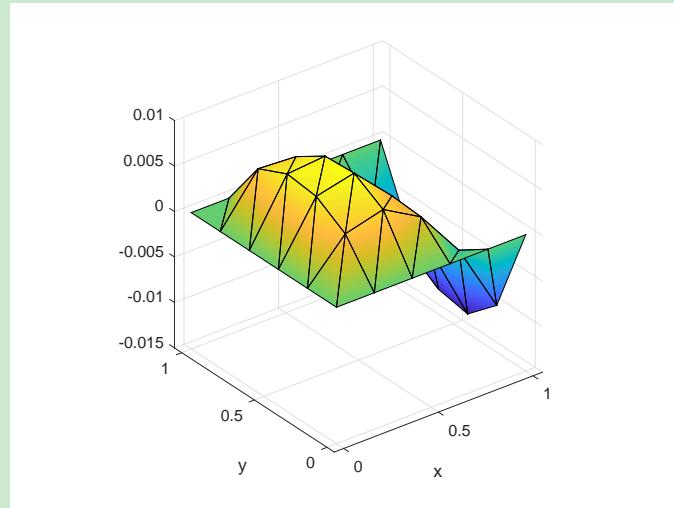


图 4.8. 绝对误差

定义整体相对误差

$$\text{Err} = \frac{\|U - u\|_2}{\|u\|_2},$$

下表给出不同划分的结果.

表 4.1. 整体相对误差 (M 是横向划分, N 是纵向划分)

M	$N = 10$	$N = 20$	$N = 50$
5	1.3931e-02	1.2994e-02	1.2098e-02
10	3.9026e-03	3.3002e-03	2.8684e-03
20	2.2352e-03	9.8932e-04	7.5369e-04

4.2.5 程序整理

函数文件

函数文件总结为

```

1 function u = Poisson(node, elem, pde, bdStruct)
2 % Poisson solves Poisson equation with P1 linear element (2D).
3 %
4 % - Delta u = f in \Omega, with
5 % Dirichlet boundary conditions u = g_D on \Gamma_D,
6 % Neumann boundary conditions grad(u)*n = g_N on \Gamma_N.
7
8 N = size(node,1); NT = size(elem,1); Ndof = 3;
9 f = pde.f;

```

```

10 % ----- Sparse assembling index -----
11 nnz = NT*Ndof^2;
12 ii = zeros(nnz,1); jj = zeros(nnz,1);
13 id = 0;
14 for i = 1:Ndof
15     for j = 1:Ndof
16         ii(id+1:id+NT) = elem(:,i); % zi
17         jj(id+1:id+NT) = elem(:,j); % zj
18         id = id + NT;
19     end
20 end
21
22 % ----- Assemble stiffness matrix -----
23 [Dphi,area] = gradbasis(node,elem);
24 K = zeros(NT,Ndof^2); % straighten
25 s = 1;
26 for i = 1:Ndof
27     for j = 1:Ndof
28         K(:,s) = sum(Dphi(:,:,i).*Dphi(:,:,j),2).*area;
29         s = s+1;
30     end
31 end
32 kk = sparse(ii,jj,K(:,N,N));
33
34 % ----- Assemble load vector -----
35 % Gauss quadrature rule
36 [lambda,weight] = quadpts(2);
37 F = zeros(NT,3); % straighten
38 for p = 1:length(weight)
39     % quadrature points in the x-y coordinate
40     pxy = lambda(p,1)*node(elem(:,1),:) ...
41         + lambda(p,2)*node(elem(:,2),:) ...
42         + lambda(p,3)*node(elem(:,3),:);
43     fxy = f(pxy); fv = fxy*lambda(p,:); % [f*phi1, f*phi2, f*phi3] ...
44         at (xp,yp)
45     F = F + weight(p)*fv;
46 end
47 F = repmat(area,1,3).*F; % F = area.*F;
48 ff = accumarray(elem(:), F(:,[N 1]));
49
```

```

49 % ----- Neumann boundary conditions -----
50 elemN = bdStruct.elemN;
51 if ~isempty(elemN)
52     z1 = node(elemN(:,1),:); z2 = node(elemN(:,2),:);
53     e = z1-z2; % e = z2-z1
54     ne = [-e(:,2),e(:,1)]; % scaled ne
55     Du = pde.Du;
56     gradu1 = Du(z1); gradu2 = Du(z2);
57     F1 = sum(ne.*gradu1,2)./2; F2 = sum(ne.*gradu2,2)./2;
58     FN = [F1,F2];
59     ff = ff + accumarray(elemN(:,1), FN(:,1));
60 end
61
62 % ----- Dirichlet boundary conditions -----
63 eD = bdStruct.eD; g_D = pde.g_D;
64 isBdNode = false(N,1); isBdNode(eD) = true;
65 bdNode = find(isBdNode); freeNode = find(~isBdNode);
66 pD = node(bdNode,:);
67 u = zeros(N,1); u(bdNode) = g_D(pD);
68 ff = ff - kk*u;
69
70 % ----- Solver -----
71 u(freeNode) = kk(freeNode)\ff(freeNode);

```

主程序

主程序如下

```

1 clc;clear;close all;
2 % ----- Mesh and boundary conditions -----
3 a1 = 0; b1 = 1; a2 = 0; b2 = 1;
4 Nx = 10; Ny = 10; h1 = (b1-a1)/Nx; h2 = (b2-a2)/Ny;
5 [node,elem] = squaremesh([a1 b1 a2 b2],h1,h2);
6
7 bdNeumann = 'abs(x-1)<1e-4'; % string for Neumann
8 bdStruct = setboundary(node,elem,bdNeumann);
9
10 % ----- PDE data -----
11 pde = Poissondata();
12

```

```

13 % ----- Poisson -----
14 uh = Poisson(node, elem, pde, bdStruct);
15
16 % ----- error analysis -----
17 uexact = pde.uexact;
18 ue = uexact(node);
19 figure,
20 subplot(1,2,1), showsolution(node, elem, uh);
21 subplot(1,2,2), showsolution(node, elem, ue);

```

注 4.5 我们始终假设有 Dirichlet 边界条件.

4.2.6 误差分析

设 u 为精确解, u_h 为数值解, L^2 误差为

$$\text{ErrL2} = \left(\sum_{K \in \mathcal{T}_h} \|u - u_h\|_{0,K}^2 \right)^{1/2},$$

而

$$\begin{aligned} \|u - u_h\|_{0,K}^2 &= \int_K [u - (u_{h1}\phi_1 + u_{h2}\phi_2 + u_{h3}\phi_3)]^2 d\sigma \\ &= |K| \sum_{p=1}^{n_g} w_p [u(z_p) - (u_{h1}\phi_1(z_p) + u_{h2}\phi_2(z_p) + u_{h3}\phi_3(z_p))]^2. \end{aligned}$$

设 `elem2dof` 按单元记录自由度的编号信息, 对 P1-Lagrange 元, 显然有 `elem2dof ... = elem`. 对固定的 p , $u_{h1}\phi_1(z_p) + u_{h2}\phi_2(z_p) + u_{h3}\phi_3(z_p)$ 在所有单元上的结果为

```

1 phi = lambda;
2 uhp = uh(elem2dof(:,1))*phi(p,1) + ...
3         uh(elem2dof(:,2))*phi(p,2) + ...
4         uh(elem2dof(:,3))*phi(p,3);

```

未乘以面积的所有单元误差为

```

1 err = zeros(NT,1);
2 for p = 1:ng
3     % P1 piecewise linear function
4     uhp = uh(elem2dof(:,1))*phi(p,1) + ...
5             uh(elem2dof(:,2))*phi(p,2) + ...
6             uh(elem2dof(:,3))*phi(p,3);
7     % quadrature points in the x-y coordinate
8     pz = lambda(p,1)*node(elem(:,1),:) ...

```

```

9         + lambda(p,2)*node(elem(:,2),:) ...
10        + lambda(p,3)*node(elem(:,3),:);
11    err = err + weight(p)*(uexact(pz) - uhp).^2;
12 end

```

综上, L^2 误差的计算可编写为如下函数.

```

1 function err = getL2error(node, elem, uh, pde, quadOrder)
2
3 if nargin == 4, quadOrder = 3; end
4
5 NT = size(elem,1);
6 % Gauss quadrature rule
7 [lambda, weight] = quadpts(quadOrder); ng = length(weight);
8 % elementwise d.o.f.s
9 elem2dof = elem;
10 % area of triangles
11 ve2 = node(elem(:,1),:)-node(elem(:,3),:);
12 ve3 = node(elem(:,2),:)-node(elem(:,1),:);
13 area = 0.5*abs(-ve3(:,1).*ve2(:,2)+ve3(:,2).*ve2(:,1));
14 % basis functions
15 phi = lambda;
16
17 % elementwise error
18 err = zeros(NT,1);
19 for p = 1:ng
20     % P1 piecewise linear function
21     uhp = uh(elem2dof(:,1))*phi(p,1) + ...
22             uh(elem2dof(:,2))*phi(p,2) + ...
23             uh(elem2dof(:,3))*phi(p,3);
24     % quadrature points in the x-y coordinate
25     pz = lambda(p,1)*node(elem(:,1),:) ...
26             + lambda(p,2)*node(elem(:,2),:) ...
27             + lambda(p,3)*node(elem(:,3),:);
28     err = err + weight(p)*(pde.uexact(pz) - uhp).^2;
29 end
30 err = area.*err;
31 % Modification
32 err(isnan(err)) = 0; % singular values, i.e. uexact(p) = inf, are ...
33 % excluded

```

```
33 err = sqrt(abs(sum(err)));
```

类似地, H^1 误差程序如下.

```
1 function err = getH1error(node, elem, uh, pde, quadOrder)
2
3 if nargin == 4, quadOrder = 3; end
4
5 NT = size(elem,1);
6 % Gauss quadrature rule
7 [lambda, weight] = quadpts(quadOrder); ng = length(weight);
8 % elementwise d.o.f.s
9 IndexDof = elem;
10 % gradient of basis functions
11 [Dphi, area] = gradbasis(node, elem);
12
13 % numerical gradient
14 uhx = uh(elem2dof(:,1)).*Dphi(:,1,1) ...
15     + uh(elem2dof(:,2)).*Dphi(:,1,2) ...
16     + uh(elem2dof(:,3)).*Dphi(:,1,3);
17 uhy = uh(elem2dof(:,1)).*Dphi(:,2,1) ...
18     + uh(elem2dof(:,2)).*Dphi(:,2,2) ...
19     + uh(elem2dof(:,3)).*Dphi(:,2,3);
20 Duh = [uhx, uhy];
21
22 % elementwise error
23 err = zeros(NT,1);
24 for p = 1:ng
25     pz = lambda(p,1)*node(elem(:,1),:) ...
26         + lambda(p,2)*node(elem(:,2),:) ...
27         + lambda(p,3)*node(elem(:,3),:);
28     err = err + weight(p)*sum((pde.Du(pz)-Duh).^2,2);
29 end
30 err = area.*err;
31 % Modification
32 err(isnan(err)) = 0; % singular values are excluded
33 err = sqrt(abs(sum(err)));
```

现在来绘制误差阶的图像. 计算中步长 h 取为单元平均面积的算术平方根, 即

$h = \sqrt{|\Omega|/NT}$. 它正比于 $NT^{-1/2}$, 为此不妨直接取 $h = NT^{-1/2}$. 设 $e = ch^r$, 则误差阶为

$$\log e = r \log h + \log c.$$

为此, 我们用一次多项式拟合 $(\log h, \log e)$, 斜率即一次项的系数即为误差阶 r .

```

1 figure,
2 err = ErrH1;
3 err(err == 0) = 1e-16; % Prevent the case err = 0, log(err) = -Inf.
4 p = polyfit(log(h(1:end)), log(err(1:end)), 1);
5 r = p(1);

```

$(\log h, \log e)$ 的图像可直接用 `loglog` 函数绘图.

```

1 loglog(h,err,'-*','linewidth',2);

```

为了显示误差阶, 我们在该数值曲线附近画一条以 r 为斜率的直线. 实现在附近的策略是, 保证第一个对应点靠近即可. 数值解的第一个纵坐标为 e_1 , 设所需曲线的纵坐标为 sh^r , 则要求

$$e_1 \sim s_1 h_1^r, \quad s_1 \sim \frac{e_1}{h_1^r}.$$

为此, 可取

$$s_1 = \frac{3}{4} \frac{e_1}{h_1^r}, \quad s(h) = \frac{3}{4} \frac{e_1}{h^r}.$$

画误差阶的函数如下

```

1 function r = showrate(h,err,opt1,opt2)
2
3 err(err == 0) = 1e-16; % Prevent the case err = 0, log(err) = -Inf.
4 p = polyfit(log(h(1:end)), log(err(1:end)), 1);
5 r = p(1);
6 s = 0.75*err(1)/h(1)^r;
7
8 loglog(h,err,opt1,'linewidth',2);
9 hold on
10 loglog(h,s*h.^r,opt2,'linewidth',1);

```

这里, `opt1` 和 `opt2` 控制线的颜色、线型等.

主程序如下

```

1 clc;clear;close all;
2 % ----- Mesh and boundary conditions -----
3 a1 = 0; b1 = 1; a2 = 0; b2 = 1;

```

```

4 Nx = 5; Ny = 5; h1 = (b1-a1)/Nx; h2 = (b2-a2)/Ny;
5 [node,elem] = squaremesh([a1 b1 a2 b2],h1,h2);
6
7 bdNeumann = 'abs(x-1)<1e-4'; % string for Neumann
8
9 % ----- PDE data -----
10 pde = Poissondata();
11
12 % ----- Poisson -----
13 maxIt = 5;
14 N = zeros(maxIt,1); h = zeros(maxIt,1);
15 ErrL2 = zeros(maxIt,1); ErrH1 = zeros(maxIt,1);
16
17 for k = 1:maxIt
18     [node,elem] = uniformrefine(node,elem);
19     bdStruct = setboundary(node,elem,bdNeumann);
20     u = Poisson(node,elem,pde,bdStruct);
21     N(k) = size(u,1); NT = size(elem,1);
22     h(k) = 1./sqrt(NT);
23     ErrL2(k) = getL2error(node,elem,u,pde);
24     ErrH1(k) = getH1error(node,elem,u,pde);
25 end
26
27 % ----- showrate -----
28 showrateh(h,ErrL2,ErrH1);

```

这里,

```

1 function showrateh(h,ErrL2,ErrH1)
2
3 str1 = '|| u - u_h ||';
4 r1 = showrate(h,ErrL2,'b-s','k--');
5 hold on
6 str2 = '|| Du - Du_h ||';
7 r2 = showrate(h,ErrH1,'r-*','k.-');
8
9 h_legend = legend(str1,['0 (h^{ num2str(r1,2) })'],...
10                   str2,['0 (h^{ num2str(r2,2) ...
11                   '} )'], 'location','best');
12 set(h_legend,'FontSize',10);

```

这里, `num2str(r1, 2)` 在化为字符的同时保留两位小数 (若保留后是整数, 则给出整数), 结果如下

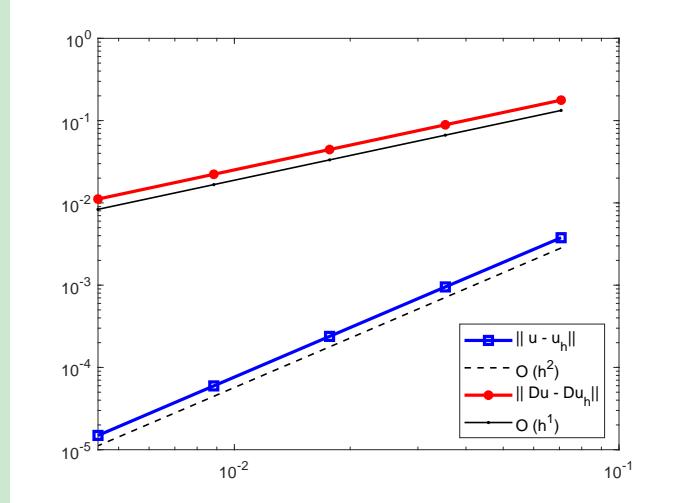


图 4.9. Poisson 方程一阶有限元的 L^2 和 H^1 误差阶

4.3 Poisson 方程的二阶有限元方法

本节不做详细说明.

4.3.1 sparse 装配指标

二次 Lagrange 元的局部自由度排列如下图

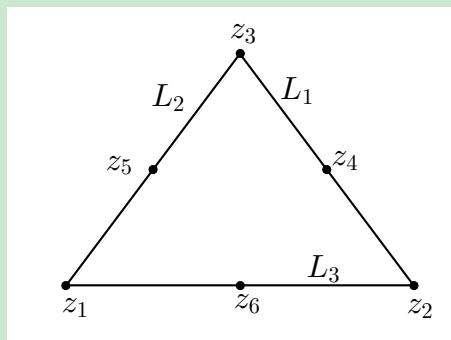


图 4.10. 二次 Lagrange 三角形 (quadratic Lagrange triangle)

整体自由度先排列网格节点值, 接着排列边中点值. 节点基为

$$\phi_i = \lambda_i(2\lambda_i - 1), \quad i = 1, 2, 3,$$

$$\phi_4 = 4\lambda_2\lambda_3, \quad \phi_5 = 4\lambda_3\lambda_1, \quad \phi_6 = 4\lambda_1\lambda_2.$$

稀疏装配指标如下

```

1 % ----- Sparse assembling index -----
2 % auxstructure
3 auxT = auxstructure(node, elem);
4 edge = auxT.edge;
5 elem2edge = auxT.elem2edge;
6 % numbers
7 N = size(node, 1); NT = size(elem, 1); NE = size(edge, 1);
8 NNdof = N + NE; Ndof = 6; %global and local d.o.f. numbers
9 % elem2dof
10 elem2 = [elem, elem2edge + N];
11 % ii, jj
12 nnz = NT*Ndof^2;
13 ii = zeros(nnz, 1); jj = zeros(nnz, 1);
14 id = 0;
15 for i = 1:Ndof
16     for j = 1:Ndof
17         ii(id+1:id+NT) = elem2(:, i); % zi
18         jj(id+1:id+NT) = elem2(:, j); % zj
19         id = id + NT;
20     end
21 end

```

注意，这里的 elem2edge 为按单元存储的边的自然序号.

4.3.2 刚度矩阵和载荷向量的计算

刚度矩阵和载荷向量类似一次 Lagrange 元计算，只需要修改基函数部分.

```

1 % ----- Stiffness matrix -----
2 % lambda and Dlambda
3 quadOrder = 4;
4 [lambda, weight] = quadpts(quadOrder); nG = length(weight);
5 [Dlambda, area] = gradbasis(node, elem);
6 % stiffness matrix
7 K = zeros(NT, Ndof^2); % straighten
8 for p = 1:nG
9     % Dphi at quadrature points
10    Dphip(:,:,6) = ...
11        4*(lambda(p,1)*Dlambda(:,:,2)+lambda(p,2)*Dlambda(:,:,1));
12    Dphip(:,:,1) = (4*lambda(p,1)-1).*Dlambda(:,:,1);

```

```

12      Dphip(:,:,2) = (4*lambda(p,2)-1).*Dlambda(:,:,2);
13      Dphip(:,:,3) = (4*lambda(p,3)-1).*Dlambda(:,:,3);
14      Dphip(:,:,4) = ...
15          4*(lambda(p,2)*Dlambda(:,:,3)+lambda(p,3)*Dlambda(:,:,2));
16      Dphip(:,:,5) = ...
17          4*(lambda(p,3)*Dlambda(:,:,1)+lambda(p,1)*Dlambda(:,:,3));
18      s = 1;
19      for i = 1:Ndof
20          for j = 1:Ndof
21              K(:,s) = K(:,s) + ...
22                  weight(p)*sum(Dphip(:,:,i).*Dphip(:,:,j),2).*area;
23          s = s+1;
24      end
25  end
26 kk = sparse(ii,jj,K(:,NNdof,NNdof));
27
28 % ----- Load vector -----
29 % basis function
30 phi(:,6) = 4*lambda(:,1).*lambda(:,2);
31 phi(:,1) = lambda(:,1).*(2*lambda(:,1)-1);
32 phi(:,2) = lambda(:,2).*(2*lambda(:,2)-1);
33 phi(:,3) = lambda(:,3).*(2*lambda(:,3)-1);
34 phi(:,4) = 4*lambda(:,2).*lambda(:,3);
35 phi(:,5) = 4*lambda(:,3).*lambda(:,1);
36 % load vector
37 F = zeros(NT,Ndof); % straighten
38 for p = 1:nG
39     % quadrature points in the x-y coordinate
40     pxy = lambda(p,1)*node(elem(:,1),:) ...
41         + lambda(p,2)*node(elem(:,2),:) ...
42         + lambda(p,3)*node(elem(:,3),:);
43     F = F + weight(p)*pde.f(pxy)*phi(p,:);
44 end
45 F = repmat(area,1,Ndof).*F; % F = area.*F;
46 ff = accumarray(elem2(:), F(:), [NNdof 1]);

```

4.3.3 边界条件的处理

Neumann 条件是一维问题的 P2-Lagrange 元，尽管前面没有介绍，但与二维问题类似。局部自由度为一维单元的左右顶点值和中点值。Neumann 条件如下计算和装配。

```
1 % ----- Neumann boundary conditions -----
2 bdIndexN = bdStruct.bdIndexN; elemN = bdStruct.elemN;
3 if ~isempty(elemN)
4     % Sparse assembling index
5     elem1 = [elemN, bdIndexN + N]; ndof = 3;
6     % Gauss quadrature rule
7     [lambda, weight] = quadpts1(quadOrder); ng = length(weight);
8     % basis function
9     phi1(:, 3) = 4*lambda(:, 1).*lambda(:, 2);
10    phi1(:, 1) = lambda(:, 1).*(2*lambda(:, 1)-1);
11    phi1(:, 2) = lambda(:, 2).*(2*lambda(:, 2)-1);
12    % nvec
13    z1 = node(elemN(:, 1), :); z2 = node(elemN(:, 2), :); nel = ...
14        size(elemN, 1);
15    e = z1-z2; he = sqrt(sum(e.^2, 2));
16    nvec = [-e(:, 2)./he, e(:, 1)./he];
17    % assemble
18    FN = zeros(nel, ndof);
19    for p = 1:ng
20        pz = lambda(p, 1)*z1 + lambda(p, 2)*z2;
21        Dnu = sum(pde.Du(pz).*nvec, 2);
22        FN = FN + weight(p)*Dnu*phi1(p, :);
23    end
24    FN = repmat(he, 1, ndof).*FN;
25    ff = ff + accumarray(elem1(:), FN(:), [NNdof 1]);
26 end
```

这里，`bdIndexN` 为 Neumann 边的自然序号。

Dirichlet 边界条件如下处理。

```
1 % ----- Dirichlet boundary conditions -----
2 eD = bdStruct.eD; bdIndexD = bdStruct.bdIndexD;
3 id = [eD; bdIndexD+N];
4 g_D = pde.g_D; elemD = bdStruct.elemD;
5 isBdNode = false(NNdof, 1); isBdNode(id) = true;
6 bdDof = (isBdNode); freeDof = (~isBdNode);
```

```

7 z1 = node(elemD(:,1),:); z2 = node(elemD(:,2),:);    zc = (z1+z2)/2;
8 pD = node(eD,:);
9 wD = g_D(pD); wc = g_D(zc);
10 u = zeros(NN dof,1); u(bdDof) = [wD; wc];
11 ff = ff - kk*u;

```

我们修改了 getL2error.m 和 getH1error.m 函数，它们可以求解 P1,P2,P3 元的相应误差。函数文件和主程序略，见 GitHub 上传文件 (PoissonP2.m 和 main_PoissonP2.m)

4.4 Poisson 方程的三阶有限元方法

P3-Lagrange 元的局部自由度有 10 个，排列为：

$$\begin{cases} v(z_i), & i = 1, 2, 3; \\ v(a_i), & i = 1, 2, 3; \\ v(b_i), & i = 1, 2, 3; \\ v(z_c). \end{cases}$$

这里， a_i 第 i 条边的 $1/3$ 点， b_i 则是 $2/3$ 点，而 z_c 是单元的重心。整体自由度类似排列，但要注意边必须事先规定好方向。

稀疏装配指标如下

```

1 % ----- Sparse assembling index -----
2 % auxstructure
3 auxT = auxstructure(node, elem);
4 edge = auxT.edge;
5 elem2edge = auxT.elem2edge;
6 % numbers
7 N = size(node, 1); NT = size(elem, 1); NE = size(edge, 1);
8 Ndof = 10; NN dof = N + 2*NE + NT;
9 % sgnelem
10 v1 = [2 3 1]; v2 = [3 1 2];
11 bdIndex = bdStruct.bdIndex; E = false(NE, 1); E(bdIndex) = 1;
12 sgnelem = sign(elem(:, v2) - elem(:, v1));
13 sgnbd = E(elem2edge); sgnelem(sgnbd) = 1;
14 sgnelem(sgnelem == -1) = 0;
15 elema = elem2edge + N*sgnelem + (N+NE)*(~sgnelem); % 1/3 point
16 elemb = elem2edge + (N+NE)*sgnelem + N*(~sgnelem); % 2/3 point
17 % local --> global
18 elem2= [elem, elema, elemb, (1:NT)' + N+2*NE];

```

```

19 % ii , jj
20 nnz = NT*Ndof ^2;
21 ii = zeros(nnz,1); jj = zeros(nnz,1);
22 id = 0;
23 for i = 1:Ndof
24     for j = 1:Ndof
25         ii(id+1:id+NT) = elem2(:,i);    % zi
26         jj(id+1:id+NT) = elem2(:,j);    % zj
27         id = id + NT;
28     end
29 end

```

注意, 一维边必须确定好定向再编号, 这里 `sgnElem` 起到该作用. 它是按单元给定的边符号, 若边是正定向 (人为规定的), 则对应 1, 否则对应 0. 为了方便处理边界, 边界边的定向始终规定为逆时针方向.

其他过程与 P2-元类似, 只需要修改基函数. 函数文件和主程序略, 见 GitHub 上传文件 (PoissonP3.m 和 main_PoissonP3.m)

后面的基于变分形式的程序中还会详细说明.

第五章 线弹性边值问题

本章考虑向量方程(也就是方程组), 即方程有多个未知函数, 经典的例子是线弹性边值问题.

5.1 线弹性边值问题简介

5.1.1 问题说明

设弹性体未受外力时所在区域为 $\Omega \subset \mathbb{R}^3$. 当它受体力 \mathbf{f} (在 Ω 中), 在 Ω 的一部分边界 Γ_1 受表面力 \mathbf{g} , 而在另一部分边界 Γ_0 上固定位移 $\mathbf{u} = \mathbf{0}$ 时, 弹性体就产生位移 \mathbf{u} . 在平衡状态下, 位移 \mathbf{u} 所满足的边值问题为

$$\begin{cases} -\partial_j \sigma_{ij}(\mathbf{u}) = f_i, & i = 1, 2, 3 \quad \text{in } \Omega, \\ \mathbf{u} = \mathbf{0} & \text{on } \Gamma_0, \\ \sigma_{ij}(\mathbf{u}) n_j = g_i, & i = 1, 2, 3 \quad \text{on } \Gamma_1, \end{cases} \quad (5.1)$$

这里约定: 凡在每一项中指标重复出现意味着从 1 到 3 (三维) 或 2 (二维) 求和. 上面的方程也可写为

$$\begin{cases} -\operatorname{div} \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{f} & \text{in } \Omega, \\ \mathbf{u} = \mathbf{0} & \text{on } \Gamma_0, \\ \boldsymbol{\sigma} \mathbf{n} = \mathbf{g} & \text{on } \Gamma_1, \end{cases}$$

其中向量规定为列向量, 而 $\operatorname{div} \boldsymbol{\sigma}$ 是对矩阵 $\boldsymbol{\sigma}$ 的每行进行 (注意它是对称矩阵).

在以上式子中, 第一式为平衡方程, 其中的 σ_{ij} 为应力张量, 它与应变张量 $\varepsilon_{ij}(\mathbf{u})$ 满足如下的本构关系 (均匀的各项同性弹性体的 Hooke 定律)

$$\sigma_{ij}(\mathbf{u}) = \sigma_{ji}(\mathbf{u}) = \lambda \varepsilon_{kk}(\mathbf{u}) \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}(\mathbf{u}), \quad (5.2)$$

$$\varepsilon_{ij}(\mathbf{u}) = \varepsilon_{ji}(\mathbf{u}) = \frac{1}{2} (\partial_j u_i + \partial_i u_j), \quad (5.3)$$

而 λ 和 μ 为 Lamé 系数. 注意, 这里 $\varepsilon_{kk}(\mathbf{u})$ 按规定是对指标求和的, 显然有 (标量)

$$\varepsilon_{kk}(\mathbf{u}) = \partial_k u_k = \operatorname{div} \mathbf{u}.$$

这样, 平衡方程也可写为如下的紧凑形式

$$-\operatorname{div} (\lambda(\operatorname{div} \mathbf{u}) \mathbf{I} + 2\mu \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u})) = \mathbf{f} \quad \text{in } \Omega.$$

把 (5.2)-(5.3) 代入 (5.1), 可获得平衡方程的另一形式

$$-\mu \Delta \mathbf{u} - (\lambda + \mu) \operatorname{grad}(\operatorname{div} \mathbf{u}) = \mathbf{f} \quad \text{in } \Omega, \quad (5.4)$$

有时候会直接考虑该方程, 因为其中每个算子都是熟悉的.

5.1.2 连续变分问题

设

$$V = \left\{ \mathbf{v} \in H^1(\Omega)^3 : \quad \mathbf{v} = \mathbf{0} \quad \text{on } \Gamma_0 \right\}, \quad (5.5)$$

令 $\mathbf{v} = (v_1, v_2, v_3)^T \in V$, 在 (5.1) 的平衡方程的两边乘以 v_i , 有

$$\int_{\Omega} -\partial_j \sigma_{ij}(\mathbf{u}) v_i dx = \int_{\Omega} f_i v_i dx,$$

这里遵循求和约定, 即上式实际上是求和. 分部积分有

$$-\int_{\partial\Omega} \sigma_{ij}(\mathbf{u}) v_i n_j ds + \int_{\Omega} \sigma_{ij}(\mathbf{u}) \partial_j v_i dx = \int_{\Omega} f_i v_i dx$$

或

$$-\int_{\partial\Omega} g_i v_i ds + \int_{\Omega} \sigma_{ij}(\mathbf{u}) \partial_j v_i dx = \int_{\Omega} f_i v_i dx.$$

由对称性,

$$\sigma_{ij}(\mathbf{u}) \partial_j v_i = \sigma_{ij}(\mathbf{u}) \frac{1}{2} (\partial_j v_i + \partial_i v_j) = \sigma_{ij}(\mathbf{u}) \varepsilon_{ij}(\mathbf{v}),$$

故

$$\int_{\Omega} \sigma_{ij}(\mathbf{u}) \varepsilon_{ij}(\mathbf{v}) dx = \int_{\Omega} \mathbf{f} \cdot \mathbf{v} dx + \int_{\Gamma_1} \mathbf{g} \cdot \mathbf{v} ds.$$

变分形式可写为三种形式.

1. 第一种形式 (elasticity1) 为: 求 $\mathbf{u} \in V$ 使得,

$$a(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \ell(\mathbf{v}), \quad \mathbf{v} \in V, \quad (5.6)$$

式中,

$$a(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \int_{\Omega} \sigma_{ij}(\mathbf{u}) \varepsilon_{ij}(\mathbf{v}) dx, \quad \ell(\mathbf{v}) = \int_{\Omega} \mathbf{f} \cdot \mathbf{v} dx + \int_{\Gamma_1} \mathbf{g} \cdot \mathbf{v} ds.$$

文献中一般习惯引入如下记号

$$\mathbf{A} : \mathbf{B} = \sum_{ij} a_{ij} b_{ij}, \quad \mathbf{A} = (a_{ij}), \quad \mathbf{B} = (b_{ij}),$$

从而双线性形式可写为

$$a(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \int_{\Omega} \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{u}) : \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{v}) dx.$$

2. 第二种形式 (elasticity2). 注意到

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}(\mathbf{u}) \varepsilon_{ij}(\mathbf{v}) &= (\lambda \varepsilon_{kk}(\mathbf{u}) \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}(\mathbf{u})) \varepsilon_{ij}(\mathbf{v}) \\ &= (\lambda \partial_k u_k \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}(\mathbf{u})) \varepsilon_{ij}(\mathbf{v}) \\ &= 2\mu \varepsilon_{ij}(\mathbf{u}) \varepsilon_{ij}(\mathbf{v}) + \lambda \partial_k u_k \varepsilon_{ii}(\mathbf{v}) \\ &= 2\mu \varepsilon_{ij}(\mathbf{u}) \varepsilon_{ij}(\mathbf{v}) + \lambda \partial_k u_k \partial_i u_i, \end{aligned}$$

双线性形式还可写为

$$\begin{aligned} a(\mathbf{u}, \mathbf{v}) &= 2\mu \int_{\Omega} \varepsilon_{ij}(\mathbf{u}) \varepsilon_{ij}(\mathbf{v}) dx + \lambda \int_{\Omega} \partial_i u_i \partial_j u_j dx, \\ &= 2\mu \int_{\Omega} \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}) : \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{v}) dx + \lambda \int_{\Omega} (\operatorname{div} \mathbf{u})(\operatorname{div} \mathbf{v}) dx. \end{aligned} \quad (5.7)$$

3. 第三种形式 (elasticity3). 也可采用 (5.4) 的形式, 具体写出来即

$$\begin{cases} -\mu \Delta u_1 - (\lambda + \mu) \partial_x (\operatorname{div} \mathbf{u}) = f_1, \\ -\mu \Delta u_2 - (\lambda + \mu) \partial_y (\operatorname{div} \mathbf{u}) = f_2, \end{cases}$$

注意 $\operatorname{div} \mathbf{u}$ 是标量. 第一式乘以 v_1 , 并分部积分有

$$\begin{aligned} &\mu \left(\int_{\Omega} \nabla u_1 \cdot \nabla v_1 dx - \int_{\partial\Omega} \partial_n u_1 v_1 ds \right) \\ &- (\lambda + \mu) \left(\int_{\partial\Omega} (\operatorname{div} \mathbf{u}) v_1 n_x ds - \int_{\Omega} (\operatorname{div} \mathbf{u}) \partial_x v_1 dx \right) = \int_{\Omega} f_1 v_1 dx. \end{aligned}$$

类似可获得第二个式子对应的结果, 将它们相加有

$$\begin{aligned} &\mu \int_{\Omega} \nabla \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{v} dx + (\lambda + \mu) \int_{\Omega} (\operatorname{div} \mathbf{u})(\operatorname{div} \mathbf{v}) dx \\ &- \mu \int_{\partial\Omega} \partial_n \mathbf{u} \cdot \mathbf{v} ds - (\lambda + \mu) \int_{\partial\Omega} (\operatorname{div} \mathbf{u})(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) ds = \int_{\Omega} \mathbf{f} \cdot \mathbf{v} dx. \end{aligned} \quad (5.8)$$

iFEM 给出了该变分形式 Dirichlet 问题的程序 (elasticity.m).

5.1.3 有限元方法

以下考虑 $\Gamma_1 = \emptyset$ 的情形. 协调一次元空间为

$$V_h = \left\{ \mathbf{v} \in (H_0^1(\Omega))^2 : \mathbf{v}|_K \in (\mathbb{P}_1(K))^2, K \in \mathcal{T}_h \right\},$$

相应的有限元问题为: 求 $\mathbf{u}_h \in V_h$ 使得

$$a(\mathbf{u}_h, \mathbf{v}) = \ell(\mathbf{v}), \quad \mathbf{v} \in V_h.$$

定理 5.1 设 \mathbf{u} 和 \mathbf{u}_h 分别为连续变分问题和近似变分问题的解, 则

$$\|\mathbf{u} - \mathbf{u}_h\|_{1,\Omega} \lesssim (2\mu + \lambda)h|\mathbf{u}|_{2,\Omega}.$$

注 5.1 对几乎不可压缩的材料, $\lambda \gg \mu$. 从上面的误差估计以及数值实例可以看到, 当 $\lambda \rightarrow \infty$ 时, 协调一次元方法不再收敛, 称为闭锁 (locking) 现象. 事实上, 我们的确可以构造出不收敛的例子.

5.2 刚度矩阵与载荷向量的装配

对向量方程, 因含有两个未知函数, 装配的过程与它们的排列顺序相关. 为了方便, 考虑如下变分形式

$$a(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \ell(\mathbf{v}),$$

式中,

$$a(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \sum_{i,j=1}^2 \int_{\Omega} u_i v_j dx, \quad \ell(\mathbf{v}) = \sum_{i=1}^2 \int_{\Omega} f_i v_i dx.$$

5.2.1 单元的向量法分析

对 $\mathbf{u} = [u_1, u_2]^T$, 为了避免下标的混乱, 我们记 $\bar{u} = u_1$ 和 $\underline{u} = u_2$, 相应的节点基展开为

$$\bar{u} = \bar{u}_1 \varphi_1 + \cdots + \bar{u}_n \varphi_n = \Psi \bar{U}, \quad \underline{u} = \underline{u}_1 \varphi_1 + \cdots + \underline{u}_n \varphi_n = \Psi \underline{U},$$

其中,

$$\Psi = [\varphi_1, \dots, \varphi_n]^T, \quad \bar{U} = [\bar{u}_1, \dots, \bar{u}_n]^T, \quad \underline{U} = [\underline{u}_1, \dots, \underline{u}_n]^T.$$

于是,

$$\mathbf{u} = \sum_{i=1}^n \bar{u}_i \bar{\varphi}_i + \sum_{i=1}^n \underline{u}_i \underline{\varphi}_i, \tag{5.9}$$

式中,

$$\bar{\varphi}_j = \begin{bmatrix} \varphi_j \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \underline{\varphi}_j = \begin{bmatrix} 0 \\ \varphi_j \end{bmatrix}, \quad j = 1, \dots, n.$$

令

$$N_j = [\bar{\varphi}_j, \underline{\varphi}_j] = \begin{bmatrix} \bar{\varphi}_j^T \\ \underline{\varphi}_j^T \end{bmatrix}, \quad j = 1, \dots, n,$$

它是对称的, 对向量法编程, 通常按行考虑(符合矩阵向量运算). 显然有

$$\mathbf{u} = \sum_{i=1}^n N_i U_i, \quad U_i = \begin{bmatrix} \bar{u}_i \\ \underline{u}_i \end{bmatrix}$$

或

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \bar{u} \\ \underline{u} \end{bmatrix} = N U,$$

式中,

$$N = [N_1, \dots, N_n], \quad U = [U_1; \dots; U_n],$$

这里向量之间的分号表示按列拉直, 与 MATLAB 的运算一致.

这样, 双线性形式和右端可写为

$$a(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \int_{\Omega} \mathbf{v}^T \mathbf{u} dx = V^T \int_{\Omega} N^T N dx U = V^T A U, \quad A = \int_{\Omega} N^T N dx,$$

$$\ell(\mathbf{v}) = \int_{\Omega} \mathbf{v}^T \mathbf{f} dx = V^T \int_{\Omega} N^T \mathbf{f} dx = V^T F, \quad F = \int_{\Omega} N^T \mathbf{f} dx,$$

于是

$$AU = F.$$

可以看到, 在把向量 $U_i = \begin{bmatrix} \bar{u}_i \\ u_i \end{bmatrix}$ 视为变量的情况下, 分析过程与标量情形完全相同.

事实上, 对三角形单元 β , 设三个顶点分别为 $\delta_1, \delta_2, \delta_3$, 取 φ_i 为局部基函数, 同上有

$$A_{\beta} U_{\beta} = F_{\beta},$$

式中,

$$A_{\beta} = \int_{\beta} N^T N dx, \quad F_{\beta} = \int_{\beta} N^T \mathbf{f} dx,$$

$$N = [N_1, N_2, N_3], \quad U_{\beta} = [U_1; U_2; U_3].$$

单元矩阵和载荷向量可分块为

$$A_{\beta} = (K_{st})_{3 \times 3}, \quad K_{ij} = \int_{\beta} N_s^T N_t dx \in \mathbb{R}^{2 \times 2},$$

$$F_{\beta} = (F_s)_{3 \times 1}, \quad F_s = \int_{\beta} N_s^T \mathbf{f} dx \in \mathbb{R}^2.$$

此时, K_{ij} 和 F_i 相当于标量情形的 k_{ij} 和 f_i .

5.2.2 sparse 装配指标

把单元刚度矩阵按分量记为 $A_{\beta} = (k_{ij})_{6 \times 6}$, 可以给出相应的 `sparse` 装配指标. 即首先给出 k_{11} 所有单元的 (i, j, s) , 并记为 i_{11}, j_{11}, s_{11} . 接着按单元矩阵的行给出其他分量的, 排列为

$$\begin{bmatrix} i_{11} & j_{11} & s_{11} \\ i_{12} & j_{12} & s_{12} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ i_{66} & j_{66} & s_{66} \end{bmatrix}.$$

笔者开始也这样考虑过, 但相较于按分量进行分块的方式, 它不利于 MATLAB 的向量运算 (或者说为了用向量运算, 一些数据需要稍复杂的存储).

若把变量按标量编程法排列, 即

$$a_\beta(\mathbf{u}, \mathbf{v}) \rightarrow \begin{bmatrix} A_{11}^\beta & A_{12}^\beta \\ A_{21}^\beta & A_{22}^\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{U}_\beta \\ U_\beta \end{bmatrix},$$

则容易发现

$$A_{ij}^\beta = (K_{st}(i, j))_{3 \times 3}, \quad 1 \leq i, j \leq 2,$$

即把每个 K_{st} 的 (i, j) 位置元素拿出来组成的矩阵恰是分块矩阵的 A_{ij}^β . 本文称这种分块的方式为标量法编程.

1. 单元分析也可按分量进行分析, 但用向量分析法更加清楚.
2. 分块单元刚度矩阵的向量稀疏指标也容易获得. 若直接用标量法编程, 则有

$$\bar{U}_\beta \leftrightarrow \text{elem}(:), \quad U_\beta \leftrightarrow \text{elem}(:) + N.$$

显然向量法只需要改为

$$\bar{U}_\beta \leftrightarrow 2 * \text{elem}(:) - 1, \quad U_\beta \leftrightarrow 2 * \text{elem}(:).$$

本文只采用前者.

刚度矩阵

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$$

的每个块都可直接按照标量情形的方法进行装配, 即用 `sparse(ii, jj, ss, N, N)` 生成, 其中的 `ii, jj` 是通用的, 由 CODE. 4.2 给出. 而 `ss` 如下获得: 将单元刚度矩阵行拉直, 逐个单元拼成一个矩阵(每行对应一个单元的拉直向量), 然后再拉直为一个列向量. 若把这些块给出的拉直向量分别记为 `ss11, ss12, ss21, ss22`, 则可如下装配

```

1 A11 = sparse(ii, jj, ss11, N, N); A12 = sparse(ii, jj, ss12, N, N);
2 A21 = sparse(ii, jj, ss21, N, N); A22 = sparse(ii, jj, ss22, N, N);
3 A = [A11, A12; A21, A22];

```

为了避免对稀疏矩阵进行运算, 上面分块装配可如下改进

CODE 5.1. 向量方程的 `sparse` 装配指标

```

1 ii11 = ii; jj11 = jj; ii12 = ii; jj12 = jj+N;
2 ii21 = ii+N; jj21 = jj; ii22 = ii+N; jj22 = jj+N;
3 ii = [ii11; ii12; ii21; ii22];

```

```

4 jj = [jj11; jj12; jj21; jj22];
5 ss = [ss11; ss12; ss21; ss22];
6 A = sparse(ii,jj,ss,2*N,2*N);

```

单元载荷 F_β 分成三块, 每块 F_s 都是两行的向量. 类似刚度矩阵,

$$F_i^\beta = (F_s(i))_{3 \times 1}, \quad i = 1, 2,$$

即把每个 F_s 的第 i 个元素拿出来组成的向量恰是分块情形的 F_i^β . 给定每块的向量 $F1, F2$, 则如下装配

```

1 ff = accumarray([elem(:); elem(:)+N], [F1(:); F2(:)], [2*N 1]);

```

5.2.3 双线性分量的配对

我们用系统方程分析法来考察一下分量配对 (v_i, u_j) 对应的单元矩阵和单元向量, 从而能够明确装配的具体对应. 对 \mathbf{u} 进行分块形式的展开 (即式 (5.9)), 变分形式对应如下若干个方程

$$\begin{cases} a(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \ell(\mathbf{v}), & \mathbf{v} = \bar{\varphi}_j, \quad j = 1, \dots, N; \\ a(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \ell(\mathbf{v}), & \mathbf{v} = \underline{\varphi}_j, \quad j = 1, \dots, N. \end{cases}$$

注意到 $\bar{\varphi}_j = [\varphi_j, 0]^T$, 第一行方程只会留下检验函数 $\bar{v} = \varphi_j$ 对应的项, 从而

$$a(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \int_{\Omega} \bar{u} \bar{v} dx + \int_{\Omega} \underline{u} \bar{v} dx, \quad \bar{v} = \varphi_j,$$

即

$$a(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \sum_{i=1}^N \int_{\Omega} \varphi_j \varphi_i dx \bar{u}_i + \sum_{i=1}^N \int_{\Omega} \varphi_j \varphi_i dx \underline{u}_i,$$

从而第一行双线性形式对应

$$a(\mathbf{u}, \mathbf{v}), \quad \mathbf{v} = \bar{\varphi}_j, \quad j = 1, \dots, N \quad \rightarrow \quad A_{11} \bar{U} + A_{12} \underline{U} = [A_{11}, A_{12}] \begin{bmatrix} \bar{U} \\ \underline{U} \end{bmatrix},$$

这里 $A_{11} = (\varphi_j, \varphi_i)$ 对应 (\bar{v}, \bar{u}) , 而 $A_{12} = (\varphi_j, \varphi_i)$ 对应 (\bar{v}, \underline{u}) . 类似地, 第二行方程对应

$$a(\mathbf{u}, \mathbf{v}), \quad \mathbf{v} = \underline{\varphi}_j, \quad j = 1, \dots, N \quad \rightarrow \quad A_{21} \bar{U} + A_{22} \underline{U} = [A_{21}, A_{22}] \begin{bmatrix} \bar{U} \\ \underline{U} \end{bmatrix},$$

这里 A_{21} 对应 (\underline{v}, \bar{u}) , 而 A_{22} 对应 $(\underline{v}, \underline{u})$. 两行方程组拼接起来就是

$$a(\mathbf{u}, \mathbf{v}) \rightarrow \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{U} \\ \underline{U} \end{bmatrix}.$$

从上面的分析可以看到,

$$(v_1, u_1) \rightarrow \begin{bmatrix} A_{11} & O \\ O & O \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{U} \\ U \end{bmatrix}; \quad (v_1, u_2) \rightarrow \begin{bmatrix} O & A_{12} \\ O & O \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{U} \\ U \end{bmatrix};$$

$$(v_2, u_1) \rightarrow \begin{bmatrix} O & O \\ A_{21} & O \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{U} \\ U \end{bmatrix}; \quad (v_2, u_2) \rightarrow \begin{bmatrix} O & O \\ O & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{U} \\ U \end{bmatrix}.$$

而 (v_i, u_j) 对应的 A_{ij} 恰是单个函数情形给出的刚度矩阵. 为此, 刚度矩阵的装配算法如下

算法 1 向量方程刚度矩阵的装配

1. 设 $\mathbf{u} = [u_1, \dots, u_d]^T$, $\mathbf{v} = [v_1, \dots, v_d]^T$ (这里 $d = 2$), 而 U_i 是 u_i 在节点基下的展开向量, 则刚度矩阵形如

$$\begin{bmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1d} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{d1} & \cdots & A_{dd} \end{bmatrix} \leftrightarrow \begin{bmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_d \end{bmatrix}.$$

2. A_{ij} 是对应 (v_i, u_j) 的双线性形式给出的刚度矩阵 (标量情形), 按前面介绍的装配算法实施.
-

类似给出载荷向量的装配, 右端为

$$\ell(\mathbf{v}) = \int_{\Omega} \mathbf{f} \cdot \mathbf{v} dx = \sum_{i=1}^d \int_{\Omega} f_i v_i dx.$$

算法 2 向量方程载荷向量的装配

1. 设 $\mathbf{f} = [f_1, \dots, f_d]^T$, 而 U_i 是 u_i 在节点基下的展开向量, 则载荷向量形如

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_d \end{bmatrix} \leftrightarrow \begin{bmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_d \end{bmatrix}.$$

2. F_i 是对应 (v_i, f_i) 的线性形式给出的载荷向量 (标量情形), 按前面介绍的装配算法实施.
-

5.3 第一种形式的变分问题

5.3.1 刚度矩阵的计算

命

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ 2\varepsilon_{12} \end{bmatrix},$$

则

$$\int_{\beta} \sigma_{ij}(\mathbf{u}) \varepsilon_{ij}(\mathbf{v}) dx = \int_{\beta} \boldsymbol{\varepsilon}^T(\mathbf{v}) \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{u}) dx,$$

且有 Hooke 定律

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\varepsilon}, \quad R = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu \end{bmatrix}.$$

设 β 对应的节点基为 ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 , 记

$$U_{\beta} = [\bar{u}_1, \underline{u}_1, \bar{u}_2, \underline{u}_2, \bar{u}_3, \underline{u}_3]^T,$$

$$N = [N_1, N_2, N_3], \quad N_i = [\bar{\phi}_i, \underline{\phi}_i] = \phi_i \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

则在单元 β 上有

$$\mathbf{u} = NU_{\beta}, \quad \mathbf{v} = NV_{\beta}.$$

此时应变向量近似为

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ 2\varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial_1 \bar{u} \\ \partial_2 \underline{u} \\ \partial_2 \bar{u} + \partial_1 \underline{u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial_1 & 0 \\ 0 & \partial_2 \\ \partial_2 & \partial_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{u} \\ \underline{u} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \partial_1 & 0 \\ 0 & \partial_2 \\ \partial_2 & \partial_1 \end{bmatrix} NU_{\beta} =: BU_{\beta},$$

式中,

$$B = [B_1, B_2, B_3], \quad B_i = \begin{bmatrix} \partial_1 \phi_i & 0 \\ 0 & \partial_2 \phi_i \\ \partial_2 \phi_i & \partial_1 \phi_i \end{bmatrix}.$$

于是双线性形式为

$$\int_{\beta} \sigma_{ij}(\mathbf{u}) \varepsilon_{ij}(\mathbf{v}) dx = V_{\beta}^T \int_{\beta} B^T R B dx U_{\beta} =: V_{\beta}^T K_{\beta} U_{\beta},$$

这里

$$K_\beta = \int_{\beta} B^T R B dx = (K_{st})_{3 \times 3}, \quad K_{st} = \int_{\beta} B_s^T R B_t dx \in \mathbb{R}^{2 \times 2}.$$

设

$$K_{st} = (k_{ij}^{st})_{2 \times 2},$$

则有

$$\begin{cases} k_{11}^{st} = \int_{\beta} (\lambda + 2\mu) \partial_1 \phi_s \partial_1 \phi_t + \mu \partial_2 \phi_s \partial_2 \phi_t, \\ k_{12}^{st} = \int_{\beta} \lambda \partial_1 \phi_s \partial_2 \phi_t + \mu \partial_2 \phi_s \partial_1 \phi_t, \\ k_{21}^{st} = \int_{\beta} \lambda \partial_2 \phi_s \partial_1 \phi_t + \mu \partial_1 \phi_s \partial_2 \phi_t, \\ k_{22}^{st} = \int_{\beta} (\lambda + 2\mu) \partial_2 \phi_s \partial_2 \phi_t + \mu \partial_1 \phi_s \partial_1 \phi_t. \end{cases}$$

下面说明一下程序的实现.

- 注意到 $\partial_j \phi_s$ 是常数, 我们有

$$(\partial_i \phi_s, \partial_j \phi_t)_\beta = \partial_i \phi_s \cdot \partial_j \phi_t \cdot |\beta|,$$

从而要计算局部节点基, 也就是面积坐标函数的导数, 以及单元的面积, 这些计算在前面已经说明过, 例如节 9.2.2. 计算中用三维数组 Dphi 存储三个基函数的导数, 如下

```

1 function [Dphi,area] = gradbasis(node,elem)
2
3 z1 = node(elem(:,1),:);
4 z2 = node(elem(:,2),:);
5 z3 = node(elem(:,3),:);
6 e1 = z2-z3; e2 = z3-z1; e3 = z1-z2;
7 area = 0.5*(-e3(:,1).*e2(:,2)+e3(:,2).*e2(:,1));
8
9 grad1 = [e1(:,2), -e1(:,1)]./(2*area); % stored in rows
10 grad2 = [e2(:,2), -e2(:,1)]./(2*area);
11 grad3 = -(grad1+grad2);
12
13 NT = size(elem,1);
14 Dphi(1:NT,:,:1) = grad1;
15 Dphi(1:NT,:,:2) = grad2;
16 Dphi(1:NT,:,:3) = grad3;

```

这里, grad1 的行对应单元.

- 可事先算出所有单元的 $(\partial_i \phi_s, \partial_j \phi_t)_\beta$, 我们用元胞数组 `Dbase` 存储, 它是 2×2 的, 每块存储一个导数配对. 根据装配的说明, 单元矩阵按行拉直, 然后逐个单元拼在一起. 为此这里每块也遵循这个规定. 程序如下

```

1 Dbase = cell(2,2);
2 for i = 1:2
3     for j = 1:2
4         k11 = Dphi(:,i,1).*Dphi(:,j,1).*area;
5         k12 = Dphi(:,i,1).*Dphi(:,j,2).*area;
6         k13 = Dphi(:,i,1).*Dphi(:,j,3).*area;
7         k21 = Dphi(:,i,2).*Dphi(:,j,1).*area;
8         k22 = Dphi(:,i,2).*Dphi(:,j,2).*area;
9         k23 = Dphi(:,i,2).*Dphi(:,j,3).*area;
10        k31 = Dphi(:,i,3).*Dphi(:,j,1).*area;
11        k32 = Dphi(:,i,3).*Dphi(:,j,2).*area;
12        k33 = Dphi(:,i,3).*Dphi(:,j,3).*area;
13        K = [k11,k12,k13,k21,k22,k23,k31,k32,k33]; % stored in ...
14        rows
15    end
16 end

```

- 单元刚度矩阵如下装配

```

1 % ----- Assemble stiffness matrix -----
2 ss11 = (lambda+2*mu)*Dbase{1,1} + mu*Dbase{2,2};
3 ss12 = lambda*Dbase{1,2} + mu*Dbase{2,1};
4 ss21 = lambda*Dbase{2,1} + mu*Dbase{1,2};
5 ss22 = (lambda+2*mu)*Dbase{2,2} + mu*Dbase{1,1};
6 ii = [ii11; ii12; ii21; ii22];
7 jj = [jj11; jj12; jj21; jj22];
8 ss = [ss11; ss12; ss21; ss22];
9 kk = sparse(ii,jj,ss,2*N,2*N);

```

这里的装配指标由 (5.1) 给出.

5.3.2 载荷向量的计算

右端为

$$\int_{\beta} \mathbf{f} \cdot \mathbf{v} dx = \int_{\beta} \mathbf{v}^T \mathbf{f} dx = V_{\beta}^T \int_{\beta} N^T \mathbf{f} dx = V_{\beta}^T F_{\beta},$$

单元载荷向量为

$$F_\beta = \int_{\beta} N^T \mathbf{f} dx = (F_i)_{3 \times 1},$$

式中,

$$F_i = \int_{\beta} N_i^T \mathbf{f} dx = \int_{\beta} \begin{bmatrix} \phi_i & 0 \\ 0 & \phi_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} dx = \int_{\beta} \begin{bmatrix} f_1 \phi_i \\ f_2 \phi_i \end{bmatrix} dx.$$

我们先计算第一个分量所有单元的结果, 再计算第二个分量的, 即分别考虑

$$f_i \phi_1, f_i \phi_2, f_i \phi_3, i = 1, 2,$$

这对应的标量情形的载荷向量, 与常规计算一致.

中点型积分公式如下计算

```

1 % mid-point quadrature rule
2 x1 = node(elem(:,1),1); y1 = node(elem(:,1),2);
3 x2 = node(elem(:,2),1); y2 = node(elem(:,2),2);
4 x3 = node(elem(:,3),1); y3 = node(elem(:,3),2);
5 xc = 1/3*(x1+x2+x3); yc = 1/3*(y1+y2+y3); pc = [xc,yc];
6
7 f1 = f(pc).*area./3; f2 = f1; f3 = f1;
8 F1 = [f1(:,1),f2(:,1),f3(:,1)];
9 F2 = [f1(:,2),f2(:,2),f3(:,2)];
10 ff = accumarray([elem(:); elem(:)+N], [F1(:); F2(:)], [2*N 1]);

```

也可用前面介绍的三角形上的 Gauss 求积公式计算, 注意此时的被积函数为 (单元排成一行)

$$f_i \phi_1, f_i \phi_2, f_i \phi_3, i = 1, 2.$$

对 $\mathbf{f} = [f_1, f_2]$, 可如下计算

```

1 % Gauss quadrature rule
2 [lambda,weight] = quadpts(2);
3 F1 = zeros(NT,3); F2 = zeros(NT,3);
4 for p = 1:length(weight)
5     pxy = lambda(p,1)*node(elem(:,1),:) ...
6         + lambda(p,2)*node(elem(:,2),:) ...
7         + lambda(p,3)*node(elem(:,3),:);
8     fxy = f(pxy); % fxy = [f1xy, f2xy]
9     F1 = F1 + weight(p)*repmat(fxy(:,1),1,3).*lambda(p,:);
10    F2 = F2 + weight(p)*repmat(fxy(:,2),1,3).*lambda(p,:);
11 end

```

```

12 F1 = repmat(area, 1, 3).*F1; % F = area.*F;
13 F2 = repmat(area, 1, 3).*F2;
14 ff = accumarray([elem(:); elem(:)+N], [F1(:); F2(:)], [2*N 1]);

```

5.3.3 Neumann 边界条件

在 Γ_1 上有附加载荷, 所得边界条件为

$$\sigma \mathbf{n} = \mathbf{g} \quad \text{on } \Gamma_1,$$

不妨称为 Neumann 边界条件. 变分形式的右端要加上

$$\int_{\Gamma_1} \mathbf{g} \cdot \mathbf{v} ds.$$

设 $\gamma = (\delta_1, \delta_2)$ 是边界边, 相应的局部节点基为 $\tilde{\phi}_1, \tilde{\phi}_2$. 记

$$U_\gamma = [\bar{u}_1, \underline{u}_1, \bar{u}_2, \underline{u}_2],$$

$$\tilde{N} = [\tilde{N}_1, \tilde{N}_2], \quad \tilde{N}_i = \tilde{\phi}_i \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

则

$$\int_{\gamma} \mathbf{g} \cdot \mathbf{v} ds = \int_{\gamma} \mathbf{v}^T \mathbf{g} ds = V_\gamma^T \int_{\gamma} \tilde{N}^T \mathbf{g} ds =: V_\gamma^T F_\gamma,$$

式中,

$$F_\gamma = \int_{\gamma} \tilde{N}^T \mathbf{g} ds = [F_1, F_2], \quad F_i = \int_{\gamma} \begin{bmatrix} g_1 \tilde{\phi}_i \\ g_2 \tilde{\phi}_i \end{bmatrix} ds.$$

由梯形公式, 有

$$F_i = \int_{\gamma} \mathbf{g} \tilde{\phi}_i ds = \int_{\gamma} \sigma \mathbf{n} \tilde{\phi}_i ds = \frac{h_\gamma}{2} \left((\sigma \mathbf{n} \tilde{\phi}_i)(\delta_1) + (\sigma \mathbf{n} \tilde{\phi}_i)(\delta_2) \right) = \frac{h_\gamma}{2} (\sigma \mathbf{n})(\delta_i),$$

其中

$$h_\gamma = |\delta_2 - \delta_1| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}.$$

注意到

$$h_\gamma \sigma \mathbf{n} = \sigma(h_\gamma \mathbf{n}),$$

而 $h_\gamma \mathbf{n}$ 恰是定向边 γ 顺时针旋转 90° 或 $-\gamma$ 逆时针旋转 90° 所得. 这样, 设 $-\gamma$ 的坐标为 (a, b) , 则 $h_\gamma \mathbf{n}$ 的坐标为 $(-b, a)$.

类似载荷向量的装配, 先计算所有 F_i 的第一个分量并放在一起, 再计算第二个分量的放在一起. 我们在 elasticitydata.m 中定义

$$g_N = [\sigma_{11}(x, y), \sigma_{22}(x, y), \sigma_{12}(x, y)],$$

结合一维问题的装配算法, Neumann 边界条件可如下编程

```

1 % ----- Neumann boundary condition -----
2 elemN = bdStruct.elemN;
3 if ~isempty(elemN)
4     g_N = pde.g_N;
5     z1 = node(elemN(:,1),:); z2 = node(elemN(:,2),:);
6     e = z1-z2; % e = z2-z1
7     ne = [-e(:,2),e(:,1)]; % scaled ne
8     Sig1 = g_N(z1); Sig2 = g_N(z2);
9     F11 = sum(ne.*Sig1(:,[1,3]),2)./2;
10    F12 = sum(ne.*Sig2(:,[1,3]),2)./2;
11    F21 = sum(ne.*Sig1(:,[3,2]),2)./2;
12    F22 = sum(ne.*Sig2(:,[3,2]),2)./2;
13    FN = [F11,F12,F21,F22];
14    ff = ff + accumarray([elemN(:); elemN(:)+N], FN(:), [2*N 1]);
15 end

```

5.3.4 Dirichlet 边界条件

边界定义函数见前面介绍的 setboundary.m. Dirichlet 边界条件类似标量情形处理, 如下

```

1 % ----- Dirichlet boundary condition -----
2 g_D = pde.g_D; eD = bdStruct.eD;
3 isBdNode = false(N,1); isBdNode(eD) = true;
4 bdNode = find(isBdNode); freeNode = find(~isBdNode);
5 pD = node(bdNode,:);
6 bdDof = [bdNode; bdNode+N]; freeDof = [freeNode; freeNode+N];
7 u = zeros(2*N,1); uD = g_D(pD); u(bdDof) = uD(:);
8 ff = ff - kk*u;
9 % ----- Solver -----
10 u(freeDof) = kk(freeDof,freeDof)\ff(freeDof);

```

5.3.5 程序整理

函数文件

前面的讨论总结为如下函数

CODE 5.2. elasticity1.m

```

1 function u = elasticity1(node,elem,pde,bdStruct)
2 %Elasticity1 Conforming P1 FEM of linear elasticity equation
3 %
4 %      u = [u1, u2]
5 %      -div (sigma) = f in \Omega
6 %      Dirichlet boundary condition u = [g1_D, g2_D] on \Gamma_D
7 %      Neumann boundary condition \sigma*n = g on \Gamma_N
8 %      \sigma = (\sigma_{ij}): stress tensor, 1 ≤ i,j ≤ 2
9
10 N = size(node,1); NT = size(elem,1); Ndof = 3;
11 mu = pde.mu; lambda = pde.lambda; f = pde.f;
12 % ----- Compute (Dbase,Djbase) -----
13 [Dphi,area] = gradbasis(node,elem);
14 Dbase = cell(2,2);
15 for i = 1:2
16     for j = 1:2
17         k11 = Dphi(:,i,1).*Dphi(:,j,1).*area;
18         k12 = Dphi(:,i,1).*Dphi(:,j,2).*area;
19         k13 = Dphi(:,i,1).*Dphi(:,j,3).*area;
20         k21 = Dphi(:,i,2).*Dphi(:,j,1).*area;
21         k22 = Dphi(:,i,2).*Dphi(:,j,2).*area;
22         k23 = Dphi(:,i,2).*Dphi(:,j,3).*area;
23         k31 = Dphi(:,i,3).*Dphi(:,j,1).*area;
24         k32 = Dphi(:,i,3).*Dphi(:,j,2).*area;
25         k33 = Dphi(:,i,3).*Dphi(:,j,3).*area;
26         K = [k11,k12,k13,k21,k22,k23,k31,k32,k33]; % stored in rows
27         Dbase{i,j} = K(:); % straighten
28     end
29 end
30
31 % ----- Sparse assembling indices -----
32 nnz = NT*Ndof^2;
33 ii = zeros(nnz,1); jj = zeros(nnz,1);
34 id = 0;
35 for i = 1:Ndof
36     for j = 1:Ndof
37         ii(id+1:id+NT) = elem(:,i); % zi
38         jj(id+1:id+NT) = elem(:,j); % zj
39         id = id + NT;
40     end

```

```

41 end
42
43 ii11 = ii; jj11 = jj; ii12 = ii; jj12 = jj+N;
44 ii21 = ii+N; jj21 = jj; ii22 = ii+N; jj22 = jj+N;
45
46 % ----- Assemble stiffness matrix -----
47 ss11 = (lambda+2*mu)*Dbase{1,1} + mu*Dbase{2,2};
48 ss12 = lambda*Dbase{1,2} + mu*Dbase{2,1};
49 ss21 = lambda*Dbase{2,1} + mu*Dbase{1,2};
50 ss22 = (lambda+2*mu)*Dbase{2,2} + mu*Dbase{1,1};
51 ii = [ii11; ii12; ii21; ii22];
52 jj = [jj11; jj12; jj21; jj22];
53 ss = [ss11; ss12; ss21; ss22];
54 kk = sparse(ii,jj,ss,2*N,2*N);
55
56 % ----- Assemble load vector -----
57 % Gauss quadrature rule
58 [lambda,weight] = quadpts(2);
59 F1 = zeros(NT,3); F2 = zeros(NT,3);
60 for p = 1:length(weight)
61     pxy = lambda(p,1)*node(elem(:,1),:) ...
62         + lambda(p,2)*node(elem(:,2),:) ...
63         + lambda(p,3)*node(elem(:,3),:);
64     fxy = f(pxy); % fxy = [f1xy,f2xy]
65     F1 = F1 + weight(p)*repmat(fxy(:,1),1,3).*lambda(p,:);
66     F2 = F2 + weight(p)*repmat(fxy(:,2),1,3).*lambda(p,:);
67 end
68 F1 = repmat(area,1,3).*F1; % F = area.*F;
69 F2 = repmat(area,1,3).*F2;
70 ff = accumarray([elem(:); elem(:)+N], [F1(:); F2(:)], [2*N 1]);
71
72 % ----- Neumann boundary condition -----
73 elemN = bdStruct.elemN;
74 if ~isempty(elemN)
75     g_N = pde.g_N;
76     z1 = node(elemN(:,1),:); z2 = node(elemN(:,2),:);
77     e = z1-z2; % e = z2-z1
78     ne = [-e(:,2),e(:,1)]; % scaled ne
79     Sig1 = g_N(z1); Sig2 = g_N(z2);
80     F11 = sum(ne.*Sig1(:,[1,3]),2)./2; F12 = ...

```

```

    sum(ne.*Sig2(:,[1,3]),2)./2; % g1
81 F21 = sum(ne.*Sig1(:,[3,2]),2)./2; F22 = ...
    sum(ne.*Sig2(:,[3,2]),2)./2;
82 FN = [F11,F12,F21,F22];
83 ff = ff + accumarray([elemN(:); elemN(:)+N], FN(:), [2*N 1]);
84 end
85
86 % ----- Dirichlet boundary condition -----
87 g_D = pde.g_D; eD = bdStruct.eD;
88 isBdNode = false(N,1); isBdNode(eD) = true;
89 bdNode = find(isBdNode); freeNode = find(~isBdNode);
90 pD = node(bdNode,:);
91 bdDof = [bdNode; bdNode+N]; freeDof = [freeNode; freeNode+N];
92 u = zeros(2*N,1); uD = g_D(pD); u(bdDof) = uD(:);
93 ff = ff - kk*u;
94
95 % ----- Solver -----
96 u(freeDof) = kk(freeDof,freeDof)\ff(freeDof);

```

主程序

设左右边界是 Neumann 边界条件, 主程序如下

CODE 5.3. main_elasticity1.m

```

1 clc;clear;close all
2 % ----- Mesh and boudary conditions -----
3 a1 = 0; b1 = 1; a2 = 0; b2 = 1;
4 Nx = 4; Ny = 4; h1 = (b1-a1)/Nx; h2 = (b2-a2)/Ny;
5 [node,elem] = squaremesh([a1 b1 a2 b2],h1,h2);
6
7 bdNeumann = 'abs(y-0)<1e-4 | abs(x-1)<1e-4'; % string for Neumann
8
9 % ----- PDE data -----
10 lambda = 1; mu = 1;
11 para.lambda = lambda; para.mu = mu;
12 pde = elasticitydata(para);
13
14 % ----- elasticity1 -----
15 maxIt = 5;

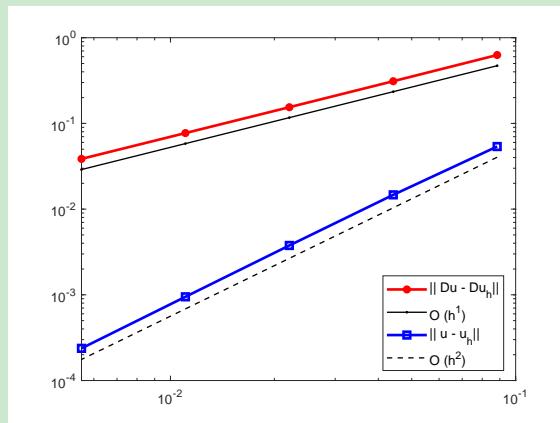
```

```

16 N = zeros(maxIt,1); h = zeros(maxIt,1);
17 ErrL2 = zeros(maxIt,1); ErrH1 = zeros(maxIt,1);
18 errwL2 = zeros(maxIt,1); errwH1 = zeros(maxIt,1);
19 for k = 1:maxIt
20     [node, elem] = uniformrefine(node, elem);
21     bdStruct = setboundary(node, elem, bdNeumann);
22     uh = elasticity1(node, elem, pde, bdStruct);
23     uh = reshape(uh, [], 2);
24     NT = size(elem, 1); h(k) = 1/sqrt(NT);
25
26     tru = eye(2); trDu = eye(4);
27     errL2 = zeros(1,2); errH1 = zeros(1,2); % square
28     for id = 1:2
29         uid = uh(:,id);
30         u = @(pz) pde.uexact(pz)*tru(:, id);
31         Du = @(pz) pde.Du(pz)*trDu(:, 2*id-1:2*id);
32         errL2(:, id) = getL2error(node, elem, uid, u);
33         errH1(:, id) = getH1error(node, elem, uid, Du);
34     end
35
36     ErrL2(k) = sqrt(sum(errL2.^2, 2));
37     ErrH1(k) = sqrt(sum(errH1.^2, 2));
38 end
39
40 % ----- Plot convergence rates -----
41 figure;
42 showrateh(h, ErrL2, ErrH1);

```

注意, 程序中通过截取向量的分量来获得分量的误差 (回忆初等变换的特点).



5.4 第二种形式的变分问题

单元变分形式为

$$\begin{aligned} a_K(\mathbf{u}, \mathbf{v}) &= 2\mu \int_K \varepsilon_{ij}(\mathbf{u}) \varepsilon_{ij}(\mathbf{v}) dx + \lambda \int_K (\partial_i u_i)(\partial_j v_j) dx \\ &=: 2\mu I + \lambda J, \end{aligned}$$

注意求和约定.

第一部分可利用向量法分析, 如下装配

```

1 % ----- Stiffness matrix for (Eij(u):Eij(v)) -----
2 ss11 = Dbase{1,1}+0.5*Dbase{2,2}; ss12 = 0.5*Dbase{2,1};
3 ss21 = 0.5*Dbase{1,2}; ss22 = Dbase{2,2}+0.5*Dbase{1,1};
4 A11 = sparse(ii,jj,ss11,N,N); A12 = sparse(ii,jj,ss12,N,N);
5 A21 = sparse(ii,jj,ss21,N,N); A22 = sparse(ii,jj,ss22,N,N);
6 A = [A11,A12; A21,A22];
7 A = 2*mu*A;

```

根据装配的说明, 上面的分块写法也可直接用 `sparse` 实现, 如下

```

1 ii11 = ii; jj11 = jj; ii12 = ii; jj12 = jj+N;
2 ii21 = ii+N; jj21 = jj; ii22 = ii+N; jj22 = jj+N;
3
4 ss11 = Dbase{1,1}+0.5*Dbase{2,2}; ss12 = 0.5*Dbase{2,1};
5 ss21 = 0.5*Dbase{1,2}; ss22 = Dbase{2,2}+0.5*Dbase{1,1};
6 ii = [ii11; ii12; ii21; ii22];
7 jj = [jj11; jj12; jj21; jj22];
8 ss = [ss11; ss12; ss21; ss22];
9 A = sparse(ii,jj,ss,2*N,2*N);
10 A = 2*mu*A;

```

现在考虑第二部分, 即

$$\lambda J = \lambda \int_K (\partial_i u_i)(\partial_j v_j) dx,$$

注意指标的求和约定. 明确写出来为

$$J = \int_K (\partial_1 v_1 \partial_1 u_1 + \partial_2 v_2 \partial_1 u_1 + \partial_1 v_1 \partial_2 u_2 + \partial_2 v_2 \partial_2 u_2) dx.$$

它的装配可根据前面的分量配对给出.

```

1 % ----- Stiffness matrix for (div u,div v) -----
2 ss11 = Dbase{1,1}; ss12 = Dbase{1,2};

```

```

3 ss21 = Dbase{2,1};           ss22 = Dbase{2,2};
4 B11 = sparse(ii,jj,ss11,N,N); B12 = sparse(ii,jj,ss12,N,N);
5 B21 = sparse(ii,jj,ss21,N,N); B22 = sparse(ii,jj,ss22,N,N);
6 B = [B11,B12; B21,B22];
7 B = lambda*B;

```

或直接装配

```

1 % (div u,div v)
2 ss11 = Dbase{1,1};           ss12 = Dbase{1,2};
3 ss21 = Dbase{2,1};           ss22 = Dbase{2,2};
4 ss = [ss11; ss12; ss21; ss22];
5 B = sparse(ii,jj,ss,2*N,2*N);
6 B = lambda*B;

```

其他过程与第一种形式相同, 不再列出 (主程序为 main_elasticity2.m).

5.5 第三种形式的变分问题

变分形式 (5.8) 的程序只需要对前面的进行简单修改即可. 需要注意的是, 此种形式产生的边界项为

$$\mu \int_{\partial\Omega} \partial_n \mathbf{u} \cdot \mathbf{v} ds + (\lambda + \mu) \int_{\partial\Omega} (\operatorname{div} \mathbf{u})(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) ds,$$

给出相应的边界项我们也可容易地处理边界项. 但弹性问题中通常不附加上面类型的边界条件, 为此, 第三种形式只考虑 Dirichlet 边界条件.

主程序为 (数据文件为 elasticitydata1.m, L 型区域, 用 MATLAB 的 PDE 工具箱生成)

CODE 5.4. main_elasticity3.m

```

1 clc;clear;close all
2 % ----- Mesh and boudary conditions -----
3 g = [2 2 2 2 2 2    % decomposed geometry matrix
4     0 1 1 -1 -1 0
5     1 1 -1 -1 0 0
6     0 0 1 1 -1 -1
7     0 1 1 -1 -1 0
8     1 1 1 1 1 1
9     0 0 0 0 0 0];
10 [p,e,t] = initmesh(g, 'hmax',1); % initial mesh
11
12 bdNeumann = []; % only Dirichlet condition for elasticity3
13

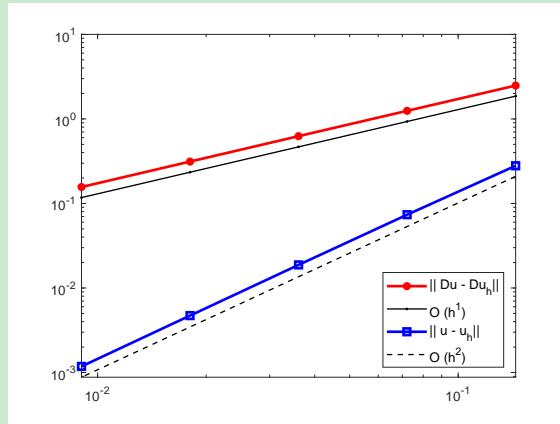
```

```

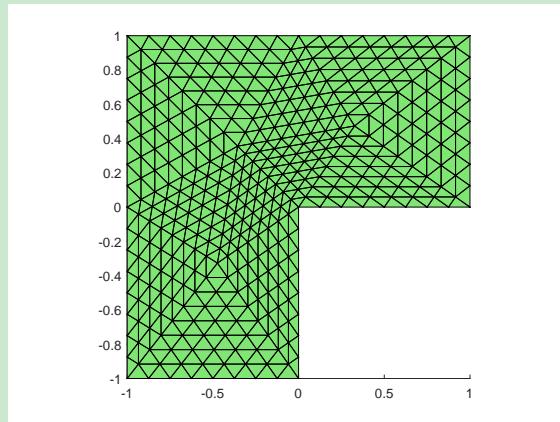
14 % ----- PDE data -----
15 lambda = 1; mu = 1;
16 para.lambda = lambda; para.mu = mu;
17 pde = elasticitydata(para);
18
19 % ----- elasticity1 -----
20 maxIt = 5;
21 N = zeros(maxIt,1); h = zeros(maxIt,1);
22 ErrL2 = zeros(maxIt,1); ErrH1 = zeros(maxIt,1);
23 errwL2 = zeros(maxIt,1); errwH1 = zeros(maxIt,1);
24 for k = 1:maxIt
25     [p,e,t] = refinemesh(g,p,e,t); % refine mesh
26     node = p'; elem = t(1:3,:)';
27     bdStruct = setboundary(node,elem,bdNeumann);
28     uh = elasticity3(node,elem,pde,bdStruct);
29     uh = reshape(uh,[],2);
30     NT = size(elem,1); h(k) = 1/sqrt(NT);
31
32     tru = eye(2); trDu = eye(4);
33     errL2 = zeros(1,2); errH1 = zeros(1,2); % square
34     for id = 1:2
35         uid = uh(:,id);
36         u = @(pz) pde.uexact(pz)*tru(:, id);
37         Du = @(pz) pde.Du(pz)*trDu(:, 2*id-1:2*id);
38         errL2(:,id) = getL2error(node,elem,uid,u);
39         errH1(:,id) = getH1error(node,elem,uid,Du);
40     end
41
42     ErrL2(k) = sqrt(sum(errL2.^2,2));
43     ErrH1(k) = sqrt(sum(errH1.^2,2));
44 end
45
46 % ----- Plot convergence rates -----
47 figure;
48 showrateh(h, ErrL2, ErrH1);

```

结果为



网格剖分如下



变分形式 (5.8) 的程序只需要对前面的进行简单修改即可, 如下

CODE 5.5. elasticity3.m

```

1 function u = elasticity3(node, elem, pde, bdStruct)
2 %Elasticity3 Conforming P1 elements discretization of linear ...
3 % elasticity equation
4 %
5 % u = [u1, u2]
6 % -mu \Delta u - (lambda + mu)*grad(div(u)) = f in \Omega
7 % Dirichlet boundary condition u = [g1_D, g2_D] on \Gamma_D.
8 %
9 N = size(node,1); NT = size(elem,1); Ndof = 3;
10 mu = pde.mu; lambda = pde.lambda; f = pde.f;
11 % ----- Compute (Dbase,Djbase) -----
12 [Dphi,area] = gradbasis(node,elem);
13 Dbase = cell(2,2);
14 for i = 1:2

```

```

15     for j = 1:2
16         k11 = Dphi(:,i,1).*Dphi(:,j,1).*area;
17         k12 = Dphi(:,i,1).*Dphi(:,j,2).*area;
18         k13 = Dphi(:,i,1).*Dphi(:,j,3).*area;
19         k21 = Dphi(:,i,2).*Dphi(:,j,1).*area;
20         k22 = Dphi(:,i,2).*Dphi(:,j,2).*area;
21         k23 = Dphi(:,i,2).*Dphi(:,j,3).*area;
22         k31 = Dphi(:,i,3).*Dphi(:,j,1).*area;
23         k32 = Dphi(:,i,3).*Dphi(:,j,2).*area;
24         k33 = Dphi(:,i,3).*Dphi(:,j,3).*area;
25         K = [k11,k12,k13,k21,k22,k23,k31,k32,k33]; % stored in rows
26         Dbase{i,j} = K(:); % straighten
27     end
28 end
29
30 % ----- Sparse assembling indices -----
31 nnz = NT*Ndof^2;
32 ii = zeros(nnz,1); jj = zeros(nnz,1);
33 id = 0;
34 for i = 1:Ndof
35     for j = 1:Ndof
36         ii(id+1:id+NT) = elem(:,i); % zi
37         jj(id+1:id+NT) = elem(:,j); % zj
38         id = id + NT;
39     end
40 end
41
42 ii11 = ii; jj11 = jj; ii12 = ii; jj12 = jj+N;
43 ii21 = ii+N; jj21 = jj; ii22 = ii+N; jj22 = jj+N;
44
45 % ----- Assemble stiffness matrix -----
46 % (grad u,grad v)
47 ss11 = Dbase{1,1}+Dbase{2,2}; ss22 = ss11;
48 ii = [ii11; ii22]; jj = [jj11; jj22]; ss = [ss11; ss22];
49 A = sparse(ii,jj,ss,2*N,2*N);
50 A = mu*A;
51
52 % (div u,div v)
53 ss11 = Dbase{1,1}; ss12 = Dbase{1,2};
54 ss21 = Dbase{2,1}; ss22 = Dbase{2,2};

```

```

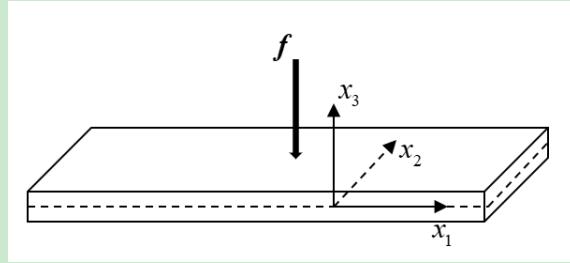
55 ii = [ii11; ii12; ii21; ii22];
56 jj = [jj11; jj12; jj21; jj22];
57 ss = [ss11; ss12; ss21; ss22];
58 B = sparse(ii,jj,ss,2*N,2*N);
59 B = (lambda+mu)*B;
60
61 % stiffness matrix
62 kk = A + B;
63
64 % ----- Assemble load vector -----
65 % Gauss quadrature rule
66 [lambda,weight] = quadpts(2);
67 F1 = zeros(NT,3); F2 = zeros(NT,3);
68 for p = 1:length(weight)
69     pxy = lambda(p,1)*node(elem(:,1),:) ...
70         + lambda(p,2)*node(elem(:,2),:) ...
71         + lambda(p,3)*node(elem(:,3),:);
72     fxy = f(pxy); % fxy = [f1xy,f2xy]
73     F1 = F1 + weight(p)*repmat(fxy(:,1),1,3).*lambda(p,:);
74     F2 = F2 + weight(p)*repmat(fxy(:,2),1,3).*lambda(p,:);
75 end
76 F1 = repmat(area,1,3).*F1; % F = area.*F;
77 F2 = repmat(area,1,3).*F2;
78 ff = accumarray([elem(:); elem(:)+N], [F1(:);F2(:)], [2*N 1]);
79
80 % ----- Dirichlet boundary condition -----
81 g_D = pde.g_D; eD = bdStruct.eD;
82 id = [eD; eD+N];
83 isBdNode = false(2*N,1); isBdNode(id) = true;
84 bdDof = (isBdNode); freeDof = (~isBdNode);
85 pD = node(eD,:);
86 u = zeros(2*N,1); uD = g_D(pD); u(bdDof) = uD(:);
87 ff = ff - kk*u;
88
89 % ----- Solver -----
90 u(freeDof) = kk(freeDof,freeDof)\ff(freeDof);

```

第六章 Kirchhoff 板弯问题

6.1 变分问题

6.1.1 平衡方程与边界条件



给定一个薄板, 即厚度 t 远小于水平方向的尺度. 称板厚方向为横向, 水平方向为纵向. 在板厚方向施加横向的载荷, 薄板会发生弯曲 (小变形), 且设板厚中面的位移, 即挠度为 w .

在弹性力学基本假设以及 Kirchhoff 计算假设下, 薄板弯曲问题可简化为挠度 w 的平面问题, 平衡方程为

$$\Omega : \quad -\partial_{ij} M_{ij}(w) = f, \quad (6.1)$$

式中,

$$M_{ij} = D ((1 - \nu) K_{ij} + \nu K_{kk} \delta_{ij}), \quad K_{ij} = -\partial_{ij} w,$$

指标范围为 $i, j = 1, 2, k \in \{1, 2\}$. 该方程是挠度 w 的四阶椭圆型偏微分方程. 若板面与地基有弹性耦合, 则平衡方程可改写为

$$\Omega : \quad -\partial_{ij} M_{ij}(w) + cw = f,$$

其中 c 为弹性耦合常数.

当 D, ν 为常数时, 含有 ν 的项会抵消, 上述方程简化为双调和方程

$$D\Delta^2 w = f.$$

注意, 对任意的 ν 都是如此, 特别地, 取 $\nu = 0$ (工程中是不允许的), 原来的平衡方程就是 $D\partial_{ij}\partial_{ij} w = f$, 显然 $\partial_{ij}\partial_{ij} = \Delta^2$. 为了方便, 以下将坐标 (x_1, x_2) 改记为 (x, y) .

本文考虑强加边界条件

$$w = \partial_n w = 0, \quad (x, y) \in \partial\Omega.$$

6.1.2 变分问题

在平衡方程 (6.1) 两边乘以检验函数 v 并分部积分后可获得变分问题, 此时会出现复杂的边界项. 但当 $v \in H_0^2(\Omega)$ 时, 这些边界项都会消失.

变分问题为: 找 $u \in V := H_0^2(\Omega)$ 使得

$$D(w, v) = F(v), \quad v \in V,$$

式中,

$$\begin{aligned} D(w, v) &= \int_{\Omega} M_{ij}(w) K_{ij}(v) dx dy + \int_{\Omega} c w v dx dy, \\ F(v) &= \int_{\Omega} f v dx dy. \end{aligned}$$

命

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} \\ M_{22} \\ M_{12} \end{bmatrix}, \quad K = \begin{bmatrix} K_{11} \\ K_{22} \\ 2K_{12} \end{bmatrix},$$

则

$$\int_{\Omega} M_{ij}(w) K_{ij}(v) dx dy = \int_{\Omega} K^T(v) M(w) dx dy,$$

且薄板弯曲的 Hooke 定律可写为

$$M = R K, \quad R = D \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu)/2 \end{bmatrix}. \quad (6.2)$$

6.1.3 有限元方法

假设单元上有 6 个自由度, 相应的节点变量和节点基函数记为

$$W_{\beta} = [w_1, \dots, w_6]^T, \quad N = [\varphi_1, \dots, \varphi_6],$$

注意基函数采用行向量写法 (回忆线性代数), 则插值函数 Q 可写为

$$Q = NW_{\beta}.$$

由 (6.2), 只需要给出 K 的近似. 显然有

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} \\ K_{22} \\ 2K_{12} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \partial_{11}w \\ \partial_{22}w \\ 2\partial_{12}w \end{bmatrix} \approx - \begin{bmatrix} \partial_{11}Q \\ \partial_{22}Q \\ 2\partial_{12}Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \partial_{11}N \\ \partial_{22}N \\ 2\partial_{12}N \end{bmatrix} W_{\beta} =: BW_{\beta},$$

其中,

$$B = - \begin{bmatrix} \partial_{11}N \\ \partial_{22}N \\ 2\partial_{12}N \end{bmatrix} = [B_1, \dots, B_6], \quad B_i = - \begin{bmatrix} \partial_{11}\varphi_i \\ \partial_{22}\varphi_i \\ 2\partial_{12}\varphi_i \end{bmatrix}.$$

双线性形式的第一项为

$$\begin{aligned} & \int_{\beta} M_{ij}(w) K_{ij}(v) dx dy \\ &= \int_{\beta} K^T(v) M(w) dx dy = \int_{\beta} K^T(v) R K(w) dx dy \\ &= V_{\beta}^T \int_{\beta} B^T R B dx dy W_{\beta} =: V_{\beta}^T K_{\beta} W_{\beta}, \end{aligned}$$

式中,

$$\begin{aligned} K_{\beta} &= \int_{\beta} B^T R B dx dy = (K_{st})_{6 \times 6}, \\ K_{st} &= \int_{\beta} B_s^T R B_t dx dy =: (k_{ij}), \end{aligned}$$

满足

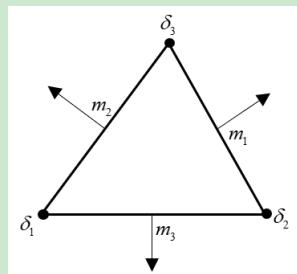
$$\begin{aligned} k_{ij} &= D \int_{\beta} [\partial_{11}\varphi_i \partial_{11}\varphi_j + \partial_{22}\varphi_i \partial_{22}\varphi_j \\ &\quad + \nu(\partial_{11}\varphi_i \partial_{22}\varphi_j + \partial_{22}\varphi_i \partial_{11}\varphi_j) \\ &\quad + 2(1-\nu)\partial_{12}\varphi_i \partial_{12}\varphi_j] dx dy. \end{aligned} \tag{6.3}$$

6.2 非协调 Morley 元

6.2.1 Morley 元的构造

Morley 元也称为完全二次三角形元, 它连 C^0 连续都不是.

局部节点基



Morley 元的三元组 $(K, \mathcal{P}, \mathcal{N})$ 中的

$$K = \beta \text{ 为三角形,}$$

$$\mathcal{P} = \mathbb{P}_2(K),$$

$$\mathcal{N} = \{v(p), p = \delta_1, \delta_2, \delta_3; \partial_n v(m), m = m_1, m_2, m_3\}.$$

注 6.1 注意 $\partial_n v = \nabla v \cdot \vec{n}$, 对相邻两个单元来说, $\partial_n v(m_i)$ 是不同的. 事实上, 它跨边界仍是连续的, 从而

$$\partial_n v(m_i)|_{\beta_1} = -\partial_n v(m_i)|_{\beta_2},$$

其中, m_i 是相邻三角形 β_1 和 β_2 公共边的中点. 对该点来说, 整体自由度只要取定一个方向即可, 注意基函数的问题会相差符号, 后面说明.

注 6.2 边中点法向导数也可换为如下的积分平均

$$\frac{1}{|e_i|} \int_{e_i} \partial_n v \, ds,$$

此时基函数和有限元空间不变 (仍有方向性问题).

现在考虑局部节点基. 取三角形 $\beta = (\delta_1, \delta_2, \delta_3)$, 三对边的中点分别记为 m_1, m_2, m_3 . 以这 6 个点作为插值点, 构造一个完全二次多项式

$$Q(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5xy + a_6y^2,$$

要求在顶点上的函数值以及三边中点上法向导数值相同, 即

$$Q(\delta_i) = w_i, \quad i = 1, 2, 3; \quad Q_n(m_i) = w_{mi}, \quad i = 1, 2, 3,$$

这 6 个条件可唯一确定多项式的 6 个系数. 设节点基函数分别为 $\varphi_i, \psi_i(x, y)$, $i = 1, 2, 3$, 即

$$Q(x, y) = \sum_{i=1}^3 w_i \varphi_i(x, y) + \sum_{i=1}^3 w_{mi} \psi_i(x, y), \quad (6.4)$$

满足

- 对 $i = 1, 2, 3$, 有

$$\varphi_i(\delta_j) = \delta_{ij}, \quad j = 1, 2, 3; \quad \partial_n \varphi_i(m_j) = 0, \quad j = 1, 2, 3.$$

- 对 $i = 4, 5, 6$, 有

$$\varphi_i(\delta_j) = 0, \quad j = 1, 2, 3; \quad \partial_n \varphi_i(m_j) = \delta_{ij}, \quad j = 1, 2, 3.$$

由这些条件, 可用重心坐标来构造基函数 φ_i . 设重心坐标为 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, i, j, k 表示 1,2,3 的轮换. 定义

$$\xi_i = x_j - x_k, \quad \eta_i = y_j - y_k, \quad \omega_i = x_j y_k - x_k y_j,$$

则三角形的有向面积可表示为

$$S = \frac{1}{2} \det \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} (\xi_1 \eta_2 - \xi_2 \eta_1) = \omega_1 \omega_2 \omega_3,$$

且

$$\lambda_i(x, y) = \frac{1}{2S} (\eta_i x - \xi_i y + \omega_i), \quad i = 1, 2, 3. \quad (6.5)$$

从 (x, y) 到 (λ_1, λ_2) 变换的 Jacobi 矩阵的行列式为

$$|J| = \det \frac{\partial(\lambda_1, \lambda_2)}{\partial(x, y)} = \frac{1}{2S}.$$

再令

$$s_{ij} = -(\xi_i \xi_j + \eta_i \eta_j),$$

则有

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_1 = \lambda_1^2 + \left(\frac{s_{12}}{l_2^2} + \frac{s_{31}}{l_3^2} \right) \lambda_2 \lambda_3 + \frac{s_{31}}{l_3^2} \lambda_3 \lambda_1 + \frac{s_{12}}{l_2^2} \lambda_1 \lambda_2, \\ \varphi_2 = \lambda_2^2 + \left(\frac{s_{23}}{l_3^2} + \frac{s_{12}}{l_1^2} \right) \lambda_3 \lambda_1 + \frac{s_{12}}{l_1^2} \lambda_1 \lambda_2, \\ \varphi_3 = \lambda_3^2 + \left(\frac{s_{23}}{l_2^2} + \frac{s_{31}}{l_1^2} \right) \lambda_2 \lambda_1 + \left(\frac{s_{31}}{l_1^2} + \frac{s_{23}}{l_2^2} \right) \lambda_1 \lambda_2, \\ \psi_1 = \frac{2S}{l_1} \lambda_1 (\lambda_1 - 1), \quad \psi_2 = \frac{2S}{l_2} \lambda_2 (\lambda_2 - 1), \quad \psi_3 = \frac{2S}{l_3} \lambda_3 (\lambda_3 - 1), \end{array} \right.$$

式中, l_i 表示第 i 个顶点所对边的边长 (注意基函数中指标的轮换).

整体节点基

前面已经指出了边中点自由度的方向性问题. 不考虑边界条件, Morley 元的整体有限元空间为

$$V_h = \{v \in L^2(\Omega) : v \text{ 的 Morley 元自由度连续}\}.$$

对内部边 e , 可任意取定一个三角形的外法向量参数作为整体节点参数, 不妨称其为定参三角形. 此时, 整体节点基限制在定参三角形上就是局部节点基, 而限制在相邻三角形上则与局部节点基相差负号.

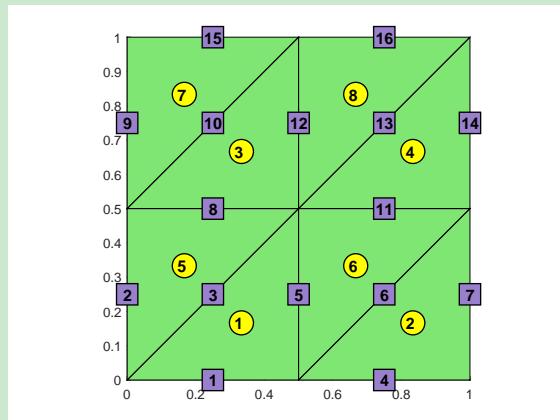
6.2.2 自由度的方向处理

方法一：边的符号化

从基函数中可以看到, ψ_i 中的 l_i 可起到变号的作用, 即可规定 l_i 是有向长度 (此时 φ 不会受到影响).

1. 边的定向: 对三角形单元的边 e , 规定逆时针方向为其在单元中的正向, 可用局部编号来确定.
2. 边的符号:
 - 对内部定向边, 称终点与起点整体编号差的符号为该边在单元中的符号.
 - 对边界边, 规定符号为正 (即 +1).
 - 显然对内部边, 限制在相邻两个单元上的符号相异.

下面说明如何获得边的符号, 用矩阵 `signelem` 存储, 它是按单元给出的.



- 辅助数据结构中给出了 `elem2edge`, 它按单元存储每条边的自然序号 (符合第 i 个顶点对边为第 i 条边), 而 `edge` 存储了一维边的端点编号. 可如下计算按单元存储的边的长度

```

1 % edge length
2 z1 = node(edge(:,1),:); z2 = node(edge(:,2),:);
3 he = sqrt(sum((z2-z1).^2,2)); L = he(elem2edge);

```

- 现在给边添上符号. 执行如下语句可获得所有单元内部边的符号

```

1 signelem = sign([elem(:,3)-elem(:,2), elem(:,1)-elem(:,3), ...
    elem(:,2)-elem(:,1)]);

```

这里边界边的符号可能不正确.

- 利用逻辑运算可修改 `signelem` 中边界边的符号差, 从而获得带符号的边长 `sgnL`.

```
1 bdIndex = bdStruct.bdIndex;
2 E = false(NE,1); E(bdIndex) = 1; sgnbd = E(elem2edge);
3 signelem(sgnbd) = 1;
4 sgnL = signelem.*L;
```

这里, `bdIndex` 是边界边的自然序号, `E` 内部边对应 `false`, 边界边对应 `true`.

这种方法可直接进行装配 (见装配的说明)

```
1 kk = sparse(ii,jj,(K(:)+G(:)).*sgnK(:,N+NE,N+NE));
2 ff = accumarray(elem2(:), F(:).*sgnF(:, [N+NE 1]));
```

方法二: 符号刚度矩阵和符号载荷向量

前面的处理方法不具有一般性. 一方面, 它需要知道基函数的具体形式, 一方面, 它改变单元刚度矩阵. 边进行符号化本质上就是基函数的符号化. 注意到

$$a_K(\pm\varphi_i, \pm\varphi_j) = \pm \cdot \pm a_K(\varphi_i, \varphi_j),$$

为此可对应给出一个符号矩阵, 它记录 (i, j) 位置的符号. 如下获得

```
1 sgnbase = ones(NT,Ndof); sgnbase(:,4:6) = signelem;
2 sgnK = zeros(NT,Ndof^2);
3 for i = 1:Ndof
4     j = 1:Ndof; jd = (i-1)*Ndof+1:i*Ndof;
5     sgnK(:,jd) = sgnbase(:,i).*sgnbase(:,j);
6 end
```

这里, `sgnbase` 记录全局基函数限制后的符号, 显然顶点对应的基函数符号都为 1, 而中点的恰好对应 `signelem`. 可以看到, 它与单元刚度矩阵的获取类似. 同理, 可给出符号载荷向量.

```
1 sgnF = ones(NT,Ndof); sgnF(:,4:6) = signelem; % sign vector
```

装配时只要把刚度矩阵和载荷向量分别点乘符号刚度矩阵和符号载荷向量即可, 如下 (见后面说明)

```
1 % ----- Assemble stiffness matrix and load vector -----
```

```

2 kk = sparse(ii,jj,(K(:)+G(:)).*sgnK(:,N+NE,N+NE));
3 ff = accumarray(elem2(:), F(:).*sgnF(:, [N+NE 1]));

```

显然这种处理可推广至任意涉及方向的自由度问题以及多角形剖分的问题 (Morley 元的虚拟元方法).

后面对第一种方法进行说明, 第二种类似.

6.2.3 sparse 装配指标

为了方便, 以下将基函数按顺序编号为 $\varphi_1, \dots, \varphi_6$, 这里,

$$\varphi_{3+i} = \psi_i, \quad i = 1, 2, 3.$$

单元变量为 $W_\beta = [w_1, \dots, w_6]^T$, 前三个对应三角形顶点, 后三个对应边的中点, 为此要对边的中点进行编号. 在辅助数据结构中, 我们给出了两个与边相关的数据结构, 它们分别是

- edge: 一维边的端点标记;
- elem2edge: 边的自然序号 (按单元存储).

将一维边接着顶点进行编号, 根据单元自由度的排序规则, 显然新的连通性信息为

```

1 elem2 = [elem, elem2edge+N];

```

类似 Poisson 方程, sparse 装配指标为

```

1 % ----- Sparse assembling indices -----
2 Ndof = 6;
3 nnz = NT*Ndof^2;
4 ii = zeros(nnz,1); jj = zeros(nnz,1);
5 id = 0;
6 for i = 1:Ndof
7     for j = 1:Ndof
8         ii(id+1:id+NT) = elem2(:,i);
9         jj(id+1:id+NT) = elem2(:,j);
10        id = id + NT;
11    end
12 end

```

设单元刚度矩阵如下排列,

```

1 K = [k11,k12,...,k66];

```

则刚度矩阵的装配与 Poisson 方程类似, 即

```
1 kk = sparse(ii,jj,K(:,N+NE,N+NE));
```

注意变量个数为 $N+NE$ 个, 其中 NE 是一维边的个数.

对载荷向量, 设其如下排列

```
1 F = [F1,F2,F3,F4,F5,F6];
```

则载荷向量如下装配

```
1 ff = accumarray(elem2(:,F(:,[N+NE 1]));
```

6.2.4 刚度矩阵与载荷向量的计算

双线性形式第一项的计算

基函数的二阶导数为常数, 由 (6.3),

$$K_{ij} = \int_{\beta} B_i^T R B_j dxdy = |\beta| B_i^T R B_j = |\beta| D \cdot (k_{ij})_{6 \times 6},$$

其中,

$$k_{ij} = \partial_{11}\varphi_i \partial_{11}\varphi_j + \partial_{22}\varphi_i \partial_{22}\varphi_j + \nu(\partial_{11}\varphi_i \partial_{22}\varphi_j + \partial_{22}\varphi_i \partial_{11}\varphi_j) + 2(1-\nu)\partial_{12}\varphi_i \partial_{12}\varphi_j.$$

直接计算有

$$\begin{cases} \partial_{11}\varphi_1 = \frac{1}{2S^2} \left(\eta_1^2 - \frac{s_{12}}{l_2^2} \eta_2^2 - \frac{s_{31}}{l_3^2} \eta_3^2 \right), \\ \partial_{22}\varphi_1 = \frac{1}{2S^2} \left(\xi_1^2 - \frac{s_{12}}{l_2^2} \xi_2^2 - \frac{s_{31}}{l_3^2} \xi_3^2 \right), \\ \partial_{12}\varphi_1 = -\frac{1}{2S^2} \left(\xi_1 \eta_1 - \frac{s_{12}}{l_2^2} \xi_2 \eta_2 - \frac{s_{31}}{l_3^2} \xi_3 \eta_3 \right), \end{cases}$$

对 φ_2 的各阶导数, 在上式中把右端的 $(1, 2, 3) \rightarrow (2, 3, 1)$; 对 φ_3 的各阶导数, 在上式中把右端的 $(1, 2, 3) \rightarrow (3, 1, 2)$. 而

$$\begin{cases} \partial_{11}\varphi_{3+i} = \frac{1}{Sl_i} \eta_i^2 \\ \partial_{22}\varphi_{3+i} = \frac{1}{Sl_i} \xi_i^2 \\ \partial_{12}\varphi_{3+i} = -\frac{1}{Sl_i} \xi_i \eta_i \end{cases}, \quad i = 1, 2, 3.$$

1. 计算中用到的 ξ_i, η_i 如下获得

```
1 auxG = auxgeometry(node, elem); area = auxG.area;
2 x1 = node(elem(:,1), 1); y1 = node(elem(:,1), 2);
```

```

3 x2 = node(elem(:,2),1); y2 = node(elem(:,2),2);
4 x3 = node(elem(:,3),1); y3 = node(elem(:,3),2);
5 % xi, eta
6 xi = [x2-x3, x3-x1, x1-x2]; eta = [y2-y3, y3-y1, y1-y2];

```

所有单元的 s_{ij} 用三维数组存储

```

1 % sij
2 sb = zeros(NT,3,3);
3 for i = 1:3
4     j = 1:3;
5     sb(:,i,j) = -xi(:,i).*xi(:,j) - eta(:,i).*eta(:,j);
6 end

```

也可用元胞数组存储, 但不利于向量化运算.

2. 现在计算基函数的二阶导数. 我们用 b_{11} 存储所有基函数的 ∂_{11} 导数, 即

$$b_{11} = [\partial_{11}\varphi_1, \partial_{11}\varphi_2, \dots, \partial_{11}\varphi_6],$$

且每行对应一个单元.

```

1 % second derivatives of phi_i
2 b11 = zeros(NT,6); b22 = b11; b12 = b11; % [phi_i, i=1:6]
3 ind = [1 2 3; 2 3 1; 3 1 2]; % cyclic permutation
4 for i = 1:3
5     j = ind(i,2); k = ind(i,3);
6     c0 = 1./(2*area.^2);
7     c1 = sb(:,i,j)./sgnL(:,j).^2;
8     c2 = sb(:,k,i)./sgnL(:,k).^2;
9     % i = 1,2,3
10    b11(:,i) = c0.* (eta(:,i).^2 - c1.*eta(:,j).^2 - ...
11                  c2.*eta(:,k).^2);
12    b22(:,i) = c0.* (xi(:,i).^2 - c1.*xi(:,j).^2 - ...
13                  c2.*xi(:,k).^2);
14    b12(:,i) = -c0.* (xi(:,i).*eta(:,i) - ...
15                  c1.*xi(:,j).*eta(:,j) - c2.*xi(:,k).*eta(:,k));
16    % i = 4,5,6
17    ci = 1./(area.*sgnL(:,i));
18    b11(:,3+i) = ci.*eta(:,i).^2;
19    b22(:,3+i) = ci.*xi(:,i).^2;

```

```

17      b12(:,3+i) = -ci.*xi(:,i).*eta(:,i);
18 end

```

注意这里用指标的轮换进行计算. 上面的循环可以避免, 只不过系数 c_0, c_1, c_2 可能要用循环生成, 如下

```

1 % second derivatives of phi_i
2 b11 = zeros(NT,6); b22 = b11; b12 = b11; % [phi_i, i=1:6]
3 ind = [1 2 3; 2 3 1; 3 1 2]; % rotation index
4 c0 = zeros(NT,3); c1 = c0; c2 = c0;
5 for i = 1:3
6     j = ind(i,2); k = ind(i,3);
7     c0(:,i) = 1./(2*area.^2);
8     c1(:,i) = sb(:,i,j)./sgnL(:,j).^2;
9     c2(:,i) = sb(:,k,i)./sgnL(:,k).^2;
10 end
11 it = ind(:,1); jt = ind(:,2); kt = ind(:,3);
12 % i = 1,2,3
13 b11(:,it) = c0.* (eta(:,it).^2 - c1.*eta(:,jt).^2 - ...
14     c2.*eta(:,kt).^2);
14 b22(:,it) = c0.* (xi(:,it).^2 - c1.*xi(:,jt).^2 - ...
15     c2.*xi(:,kt).^2);
15 b12(:,it) = -c0.* (xi(:,it).*eta(:,it) - ...
16     c1.*xi(:,jt).*eta(:,jt) - c2.*xi(:,kt).*eta(:,kt));
16 % i = 4,5,6
17 ci = 1./(area.*sgnL(:,it));
18 b11(:,3+it) = ci.*eta(:,it).^2;
19 b22(:,3+it) = ci.*xi(:,it).^2;
20 b12(:,3+it) = -ci.*xi(:,it).*eta(:,it);

```

3. 第一项对应的单元刚度矩阵为

```

1 K = zeros(NT,Ndof^2);
2 for i = 1:Ndof
3     j = 1:Ndof; jd = (i-1)*Ndof+1:i*Ndof;
4     K(:,jd) = b11(:,i).*b11(:,j) + b22(:,i).*b22(:,j) ...
5         + para.nu*(b11(:,i).*b22(:,j) + b22(:,i).*b11(:,j)) ...
6         + 2*(1-para.nu)*b12(:,i).*b12(:,j);
7 end
8 K = D*area.*K;

```

双线性形式第二项的计算

双线性形式的第二项为

$$\int_{\beta} c w v dxdy = V_{\beta}^T \int_{\beta} c N^T N dxdy W_{\beta} = V_{\beta}^T G_{\beta} W_{\beta},$$

其中地基能量阵

$$G_{\beta} = \int_{\beta} c N^T N dxdy = (g_{ij})_{6 \times 6}, \quad g_{ij} = \int_{\beta} c \varphi_i \varphi_j dxdy.$$

以下用三角形上的 Gauss 公式计算, 参考前面的说明, 如节 4.2.2.

(a) 我们要对积分点进行循环, 如下可获得所有单元固定积分点处的基函数值.

```
1 % basis functions at the p-th quadrture point
2     base = zeros(NT,Ndof);
3     % i = 1,2,3
4     base(:,it) = lambda(p,it).^2 + ...
5             c3.*lambda(p,jt).*lambda(p,kt) ...
6             + c2.*lambda(p,kt).*lambda(p,it) + ...
7             c1.*lambda(p,it).*lambda(p,jt);
8     % i = 4,5,6
9     ci = 2*area./sgnL(:,it);
10    base(:,3+it) = ci.*lambda(p,it).*(lambda(p,it)-1);
```

(b) 刚度矩阵 G 如下计算

```
1 % Second stiffness matrix
2     for i = 1:Ndof
3         j = 1:Ndof; jd = (i-1)*Ndof+1:i*Ndof;
4         gs = cf(pxy).*base(:,i).*base(:,j);
5         G(:,jd) = G(:,jd) + weight(p)*gs;
6     end
```

这里只是第 p 个积分点的部分, 循环即得最终的矩阵 (未乘以单元面积). 系数函数若是常数, 可如下转化为匿名函数

```
1 if isnumeric(para.c), cf = @(xy) para.c+0*xy(:,1); end
```

(c) 循环即可获得 G , 最终如下装配

```
1 kk = sparse(ii,jj,K(:)+G(:),N+NE,N+NE);
```

注 6.3 当 $c = 0$ 时, 上面的一些计算可以去掉, 但其过程在载荷向量的计算中用到.

载荷向量的计算

右端

$$\int_{\beta} f v dx dy = V_{\beta}^T \int_{\beta} f N^T dx dy = V_{\beta}^T F_{\beta},$$

其中,

$$F_{\beta} = \int_{\beta} f N dx dy = (F_i)_{6 \times 1}, \quad F_i = \int_{\beta} f \varphi_i dx dy.$$

载荷向量可如下计算

```
1 F = F + weight(p)*f(pxy).*base;
```

循环即得最终的 (未乘以单元面积).

6.2.5 边界条件的处理

我们考虑的是强加边界条件

$$w = \partial_n w = 0, \quad (x, y) \in \partial\Omega,$$

这里可以是非齐次的 (这两个条件都是 Dirichlet 边界条件).

$w|_{\partial\Omega} = g$ 与常规情形一样处理. 现考虑 $\partial_n w|_{\partial\Omega} = g_n$.

1. Morley 元构造时, 三角形边上中点处的法向导数值是自由度. 这样, 第二个条件可直接替换已知法向导数值, 这与第一个条件是类似的.
2. 在 setboundary.m 中我们给出了 Dirichlet 点的编号 eD 以及边界边的编号 $bdIndex$, 这样约束点的编号为

```
1 eD = bdStruct.eD; elemD = bdStruct.elemD;
2 bdIndex = bdStruct.bdIndex; % indices of boundary edges
3 id = [eD; bdIndex+N];
```

由此给出自由点编号

```
1 isBdDof = false(N+NE,1); isBdDof(id) = true;
2 bdDof = find(isBdDof); freeDof = find(~isBdDof);
```

3. 边界节点值为

```
1 g_D = pde.g_D;
2 pD = node(eD,:); wD = g_D(pD);
```

边界边中点法向导数值如下计算

```

1 Dw = pde.Dw;
2 z1 = node(elemD(:,1),:); z2 = node(elemD(:,2),:); zc = (z1+z2)./2;
3 e = z1-z2; % e = z2-z1
4 ne = [-e(:,2),e(:,1)]; ne = ne./he(bdIndex);
5 wuD = sum(Dw(zc).*ne,2);

```

这里 Dw 是梯度 ∇w , 而 $\partial_n w = \nabla w \cdot \vec{n}$ 中的 \vec{n} 通过边界边的旋转获得 (并进行单位化).

4. 这样, 我们如下求解

```

1 w = zeros(N+NE,1); w(bdDof) = [wD; wuD];
2 ff = ff - kk*w;
3 w(freeDof) = kk(freeDof,freeDof)\ff(freeDof);
4 w = w(1:N);

```

6.2.6 数值结果

主程序为 main_PlateBending_Morley.m, 相应的函数文件为 PlateBendingMorley.m, 用到的数据文件为 PlateBendingData.m. 这里不再给出具体程序, 参见 GitHub 上传程序 (elasticity 文件夹中).

区域 $[0, 1]^2$ 的结果如下

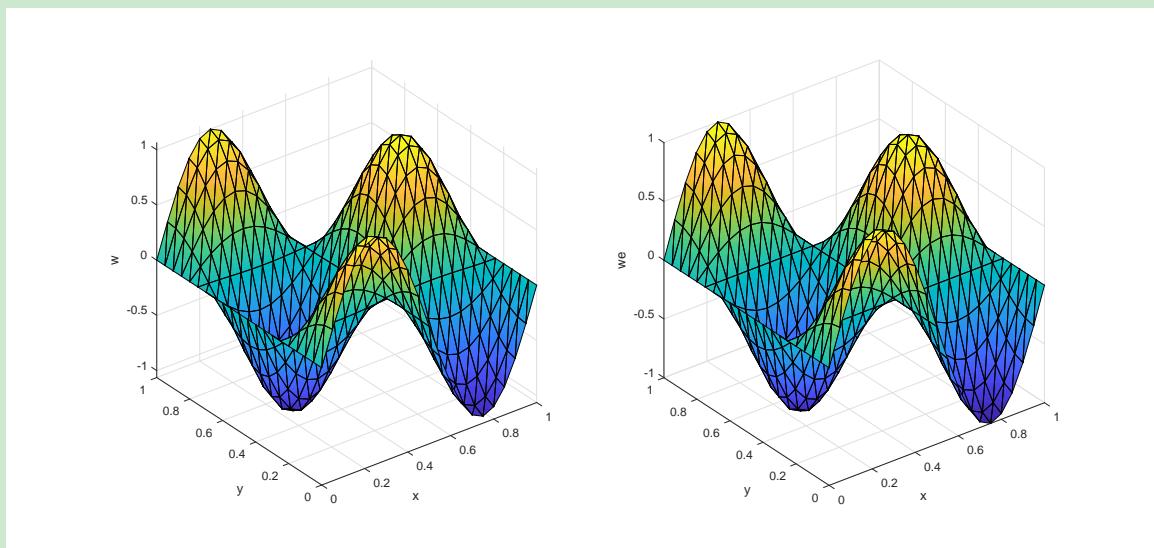


图 6.1. Morley 元方法的数值解与精确解 ($N_x=N_y=20$)

绝对误差见下图

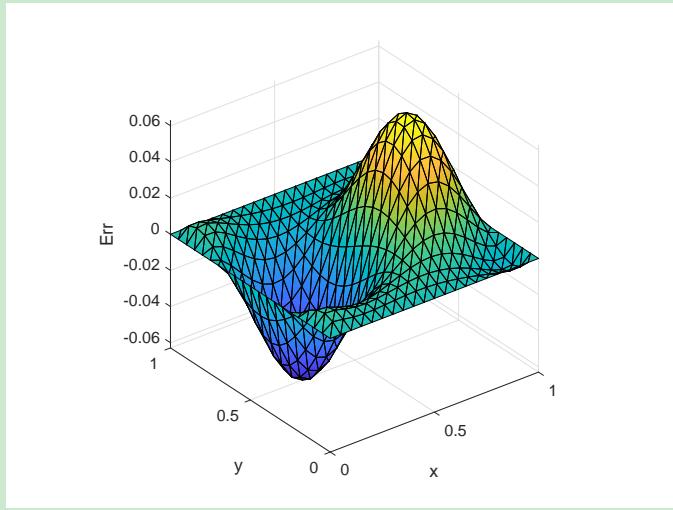


图 6.2. Morley 元方法的绝对误差 ($N_x=N_y=20$)

6.3 非协调 Zienkiewicz 元

Zienkiewicz 元是一种不完全三次三角形元 (Serendipity element), 它是 C^0 连续的.

6.3.1 Zienkiewicz 元的构造

三次插值多项式有 10 个自由度, 一种减少自由度的方法就是直接去掉三次多项式基中的某些项或者某些项共用一个系数.

1. 我们知道三次多项式在面积坐标下可表示成 λ_1, λ_2 和 λ_3 的齐三次式, 即 $\forall P \in \mathbb{P}_3$, 有 $P = \sum_{i+j+k=3} c_{ijk} \lambda_1^i \lambda_2^j \lambda_3^k$. 因形心对应的节点基为 $27\lambda_1\lambda_2\lambda_3$, 故一个例子是在 $P = \sum_{i+j+k=3} a_{ijk} \lambda_1^i \lambda_2^j \lambda_3^k$ 中去掉 $\lambda_1\lambda_2\lambda_3$ 的这一项构造不完全的三次插值.
2. 尽管在边上附加 9 个条件可唯一确定该多项式, 但这样的插值对一次式都不准确. 事实上, 对一次式 $P_1(\lambda) = \lambda_1$, 我们把它表为齐三次式如下

$$\begin{aligned} P_1(\lambda) &= \lambda_1 = \lambda_1(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)^2 \\ &= \lambda_1^3 + \lambda_1\lambda_2^2 + \lambda_1\lambda_3^2 + 2\lambda_1^2\lambda_2 + 2\lambda_1^2\lambda_3 + 2\lambda_1\lambda_2\lambda_3. \end{aligned}$$

这表明为了让一次式精确, 不仅 $\lambda_1\lambda_2\lambda_3$ 不能丢掉, 而且所有含 λ_1 的齐三次单项式都不能去掉. 同理为了让 $P_i(\lambda) = \lambda_i$ 精确, 所有含有 λ_i 的齐三次单项式都不能去掉.

3. 我们的目标是插值的逼近程度尽量高. 三次多项式已不可能, 只好退而求其次, 考虑逼近程度达到二次多项式. 也就是说, 在已有的 9 个自由度的前提下, 再加一个限制条件: 插值的逼近程度达到二次多项式. 由这个限制可获得插值多项式系数的新的关系式 (见文献 [1] 中的 (6.25) 式).

给定插值多项式 Q , Zienkiewicz 元构造的条件是

- 给定三角形顶点处的函数值以及两个偏导数值, 即

$$Q(\delta_i) = w_i, \quad Q_x(\delta_i) = w_{xi}, \quad Q_y(\delta_i) = w_{yi}, \quad i = 1, 2, 3.$$

- 插值对二次多项式精确, 即插值多项式包含二次多项式.

经过一些细致的推导, 我们有

$$Q(x, y) = \sum_{i=1}^3 w_i \varphi_i + w_{xi} \psi_i + w_{yi} \zeta_i,$$

其中,

$$\begin{cases} \varphi_1 = \lambda_1^2(3 - 2\lambda_1) + 2\lambda_1\lambda_2\lambda_3, \\ \varphi_2 = \lambda_2^2(3 - 2\lambda_2) + 2\lambda_1\lambda_2\lambda_3, \\ \varphi_3 = \lambda_3^2(3 - 2\lambda_3) + 2\lambda_1\lambda_2\lambda_3, \\ \psi_1 = \lambda_1^2(\xi_1\lambda_2 - \xi_2\lambda_1 + \xi_2) + \left(\frac{1}{2}\xi_1 + \xi_2\right)\lambda_1\lambda_2\lambda_3, \\ \psi_2 = \lambda_2^2(\xi_1\lambda_2 - \xi_2\lambda_1 - \xi_1) - \left(\frac{1}{2}\xi_2 + \xi_1\right)\lambda_1\lambda_2\lambda_3, \\ \psi_3 = \lambda_3^2(\xi_1\lambda_2 - \xi_2\lambda_1) + \frac{1}{2}(\xi_1 - \xi_2)\lambda_1\lambda_2\lambda_3, \\ \zeta_1 = \lambda_1^2(\eta_1\lambda_2 - \eta_2\lambda_1 + \eta_2) + \left(\frac{1}{2}\eta_1 + \eta_2\right)\lambda_1\lambda_2\lambda_3, \\ \zeta_2 = \lambda_2^2(\eta_1\lambda_2 - \eta_2\lambda_1 - \eta_1) - \left(\frac{1}{2}\eta_2 + \eta_1\right)\lambda_1\lambda_2\lambda_3, \\ \zeta_3 = \lambda_3^2(\eta_1\lambda_2 - \eta_2\lambda_1) + \frac{1}{2}(\eta_1 - \eta_2)\lambda_1\lambda_2\lambda_3. \end{cases}$$

可以检验, 这些基函数的系数满足限制条件.

6.3.2 sparse 装配指标

整体自由度如下排列

$$W = [w_1, \dots, w_N, w_{x1}, \dots, w_{xN}, w_{y1}, \dots, w_{yN}],$$

即先排列所有顶点函数值, 再排顶点处对 x 求偏导的值, 最后排对 y 求偏导的值.

文献 [1] 在分析单元的时候, 将单元变量如下排列

$$[w_1, w_{x1}, w_{y1}, \quad w_2, w_{x2}, w_{y2}, \quad w_3, w_{x3}, w_{y3}]^T,$$

事实上, 工程书上一般都是如此做的. 但从编程的向量化角度来看, 最好还是按照 Morley 元的情形如下排列

$$W_\beta = [w_1, w_2, w_3, \quad w_{x1}, w_{x2}, w_{x3}, \quad w_{y1}, w_{y2}, w_{y3}]^T.$$

显然装配指标为

```

1 % ----- Sparse assembling indices -----
2 N = size(node,1); NT = size(elem,1); Ndof = 9;
3 elem2 = [elem, elem+N, elem+2*N];
4 nnz = NT*Ndof^2;
5 ii = zeros(nnz,1); jj = zeros(nnz,1);
6 id = 0;
7 for i = 1:Ndof
8     for j = 1:Ndof
9         ii(id+1:id+NT) = elem2(:,i);
10        jj(id+1:id+NT) = elem2(:,j);
11        id = id + NT;
12    end
13 end

```

6.3.3 双线性形式第一项的计算

按照上面说的排列方式, 单元分析与 Morley 元完全相同. 此时

$$\varphi_{3+i} = \xi_i, \quad \varphi_{6+i} = \zeta_i, \quad i = 1, 2, 3.$$

单元刚度矩阵为

$$K_\beta = \int_\beta B^T R B dx dy = (k_{ij})_{9 \times 9},$$

其中,

$$k_{ij} = D \int_\beta \partial_{11}\varphi_i \partial_{11}\varphi_j + \partial_{22}\varphi_i \partial_{22}\varphi_j + \nu(\partial_{11}\varphi_i \partial_{22}\varphi_j + \partial_{22}\varphi_i \partial_{11}\varphi_j) + 2(1-\nu)\partial_{12}\varphi_i \partial_{12}\varphi_j.$$

与 Morley 元不同的是, 此时被积函数不是常数. 每个二阶导数都形如 $f(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$, 可用三角形上的 Gauss 求积计算.

为了计算基函数的二阶导, 从前面基函数的表达式可以看到, 这归结于计算三次齐次式的二阶导

$$\partial_{11}(\lambda_i \lambda_j \lambda_k), \quad \partial_{22}(\lambda_i \lambda_j \lambda_k), \quad \partial_{12}(\lambda_i \lambda_j \lambda_k), \quad 1 \leq i, j, k \leq 3$$

以及 λ_i^2 的二阶导.

1. 我们考虑一般情形的二次齐次式 $\lambda_i \lambda_j$. 直接计算可知, $\partial_{\alpha\beta}(\lambda_i \lambda_j)$ 由两部分组成

- 对同一个求二阶导

$$(\partial_{\alpha\beta} \lambda_i) \lambda_j + \lambda_i (\partial_{\alpha\beta} \lambda_j);$$

- 对不同位置求导

$$(\partial_\beta \lambda_i)(\partial_\alpha \lambda_j) + (\partial_\alpha \lambda_i)(\partial_\beta \lambda_j).$$

注意到 λ_i 是一次多项式, 第一部分为零, 故

$$\partial_{\alpha\beta}(\lambda_i \lambda_j) = (\partial_\beta \lambda_i)(\partial_\alpha \lambda_j) + (\partial_\alpha \lambda_i)(\partial_\beta \lambda_j).$$

归结为 λ_i 的一阶导的计算.

2. 再考虑三次齐次式. $\partial_{\alpha\beta}(\lambda_i \lambda_j \lambda_k)$ 的和项由如下部分组成

- 对同一个求二阶导

$$(\partial_{\alpha\beta} \lambda_i) \lambda_j \lambda_k + \lambda_i (\partial_{\alpha\beta} \lambda_j) \lambda_k + \lambda_i \lambda_j (\partial_{\alpha\beta} \lambda_k);$$

- 对 1,2 位置求导

$$(\partial_\alpha \lambda_i)(\partial_\beta \lambda_j) \lambda_k + (\partial_\beta \lambda_i)(\partial_\alpha \lambda_j) \lambda_k;$$

- 对 2,3 位置求导

$$\lambda_i (\partial_\alpha \lambda_j)(\partial_\beta \lambda_k) + \lambda_i (\partial_\beta \lambda_j)(\partial_\alpha \lambda_k);$$

- 对 3,1 位置求导

$$(\partial_\alpha \lambda_i) \lambda_j (\partial_\beta \lambda_k) + (\partial_\beta \lambda_i) \lambda_j (\partial_\alpha \lambda_k).$$

类似地, 第一部分为零. 这样, 它们的二阶导又归结为 λ_i 的一阶导的计算. 易知有

$$\partial_1 \lambda_i = \frac{\eta_i}{2S}, \quad \partial_2 \lambda_i = -\frac{\xi_i}{2S}, \quad i = 1, 2, 3,$$

它们都是常数.

先计算面积坐标函数的一阶导. 这在前面章节的讨论中已经给出了, 函数为 gradbasis.m (节 4.2.1). 它给出所有单元的结果且以三维数组存储 (事实上还输出了面积), 形式如下

```

1 Dphi(1:NT,:,:,1) = grad1;
2 Dphi(1:NT,:,:,2) = grad2;
3 Dphi(1:NT,:,:,3) = grad3;

```

它的 3 个部分都是 $NT \times 2$ 的矩阵, 该矩阵的第一列存储 ∂_1 的结果, 第二列则为 ∂_2 的.

接着计算

$$\partial_{\alpha\beta}(\lambda_i \lambda_j) = (\partial_\beta \lambda_i)(\partial_\alpha \lambda_j) + (\partial_\alpha \lambda_i)(\partial_\beta \lambda_j),$$

它显然为常数. 为了方便, 我们用函数 quadbasis.m 计算 (i, j) 配对的所有导数 (所有单元的结果), 如下排列

$$[\partial_{11}(\lambda_i \lambda_j), \partial_{22}(\lambda_i \lambda_j), \partial_{12}(\lambda_i \lambda_j)],$$

这里每列都是所有单元的. 考虑到 Gauss 积分点的问题, 该结果复制 nI 列, 每列对应一个积分点. 我们用三维数组存储, 维数为 $NT \times nI \times 3$

```

1 function Dquad = quadbasis(i,j,Dphi,lambda)
2
3 % second derivative of lambda_i*lambda_j
4 NT = size(Dphi,1); nI = size(lambda,1);
5 Dquad = zeros(NT,nI,3); % [11,22,12]
6 Dquad(1:NT,:,1) = 2*Dphi(:,1,i).*Dphi(:,1,j).*ones(1,nI);
7 Dquad(1:NT,:,2) = 2*Dphi(:,2,i).*Dphi(:,2,j).*ones(1,nI);
8 Dquad(1:NT,:,3) = (Dphi(:,1,i).*Dphi(:,2,j) + ...
    Dphi(:,2,i).*Dphi(:,1,j)).*ones(1,nI);

```

还要准备所有三次齐次式的二阶导在 Gauss 积分点处的值. 为了方便, 我们定义一个函数 tribasis.m. 它的输入是齐次式的下标 (i, j, k) , 返回的是三个二阶导在积分点处的值 (所有单元). 同样用三维数组存储, 维数为 $NT \times nI \times 3$, 其中, nI 是积分点个数, 3 对应三个二阶导 $[\partial_{11}, \partial_{22}, \partial_{12}]$.

```

1 function Dtri = tribasis(i,j,k,Dphi,lambda)
2
3 % second derivative of lambda_i*lambda_j*lambda_k
4 NT = size(Dphi,1); nI = size(lambda,1);
5 Dtri = zeros(NT,nI,3); % [11,22,12]
6 ss = [1 2 1]; tt = [1 2 2];
7 for m = 1:3 % loop for [11,22,12]
8     s = ss(m); t = tt(m);
9     b1 = ...
    (Dphi(:,s,i).*Dphi(:,t,j)+Dphi(:,t,i).*Dphi(:,s,j))*lambda(:,k)';
10    b2 = ...
    (Dphi(:,s,j).*Dphi(:,t,k)+Dphi(:,t,j).*Dphi(:,s,k))*lambda(:,i)';
11    b3 = ...
    (Dphi(:,s,i).*Dphi(:,t,k)+Dphi(:,t,i).*Dphi(:,s,k))*lambda(:,j)';
12    Dtri(1:NT,:,m) = b1 + b2 + b3;
13 end

```

上面两个函数可进一步写成匿名函数, 以方便输入不同配对, 如下

```

1 Dquad = @(i,j) quadbasis(i,j,Dphi,lambda);
2 Dtri = @(i,j,k) tribasis(i,j,k,Dphi,lambda);

```

这样, 基函数的二阶导数可如下计算

```

1 % ----- second derivatives of basis functions -----
2 b11 = zeros(NT,Ndof,nI); b22 = b11; b12 = b11;
3 for i = 1:3
4     % \phi (11,22,12)
5     DD = 3*Dquad(i,i)-2*Dtri(i,i,i)+2*Dtri(1,2,3);
6     b11(:,i,:) = DD(:, :, 1);
7     b22(:,i,:) = DD(:, :, 2);
8     b12(:,i,:) = DD(:, :, 3);
9     % \psi (11,22,12)
10    c1 = xi(:,1);
11    c2 = -xi(:,2);
12    c3 = -[c2,c1,zeros(NT,1)];
13    c4 = [0.5*c1-c2, 0.5*c2-c1, 0.5*(c1+c2)];
14    DD = c1.*Dtri(i,i,2)+c2.*Dtri(i,i,1) + c3(:,i).*Dquad(i,i)...
15        + c4(:,i).*Dtri(1,2,3);
16    b11(:,3+i,:)= DD(:, :, 1);
17    b22(:,3+i,:)= DD(:, :, 2);
18    b12(:,3+i,:)= DD(:, :, 3);
19    % \zeta (11,22,12)
20    c1 = eta(:,1);
21    c2 = -eta(:,2);
22    c3 = -[c2,c1,zeros(NT,1)];
23    c4 = [0.5*c1-c2, 0.5*c2-c1, 0.5*(c1+c2)];
24    DD = c1.*Dtri(i,i,2) + c2.*Dtri(i,i,1) + c3(:,i).*Dquad(i,i)...
25        + c4(:,i).*Dtri(1,2,3);
26    b11(:,6+i,:)= DD(:, :, 1);
27    b22(:,6+i,:)= DD(:, :, 2);
28    b12(:,6+i,:)= DD(:, :, 3);
29 end

```

有了基函数的二阶导, 就可如下用 Gauss 积分计算积分

```

1 % ----- First stiffness matrix -----
2 K = zeros(NT,Ndof^2);
3 for i = 1:Ndof
4     j = 1:Ndof; jd = (i-1)*Ndof+1:i*Ndof;

```

```

5   for m = 1:nI
6       Km = b11(:,i,m).*b11(:,j,m) + b22(:,i,m).*b22(:,j,m) ...
7           + nu*(b11(:,i,m).*b22(:,j,m) + b22(:,i,m).*b11(:,j,m)) ...
8           + 2*(1-nu)*b12(:,i,m).*b12(:,j,m);
9       K(:,jd) = K(:,jd) + weight(m)*Km;
10      end
11  end
12 K = D*area.*K;

```

6.3.4 双线性形式第二项的计算

类似 Morley 元可如下给出计算.

```

1 % ----- Second stiffness matrix and load vector -----
2 G = zeros(NT,Ndof^2); F = zeros(NT,Ndof);
3 if isnumeric(para.c), cf = @ (xy) para.c+0*xy(:,1); end
4 for p = 1:nI
5     % quadrature points in the x-y coordinate
6     pxy = lambda(p,1)*node(elem(:,1),:) ...
7         + lambda(p,2)*node(elem(:,2),:) ...
8         + lambda(p,3)*node(elem(:,3),:);
9     % basis functions at the p-th quadrature point
10    base = zeros(NT,Ndof);
11    for i = 1:3
12        % \phi
13        lam123 = lambda(p,1).*lambda(p,2).*lambda(p,3);
14        base(:,i) = lambda(p,i).^(2.* (3-2*lambda(p,i)) + 2*lam123);
15        % \psi
16        base(:,3+i) = lambda(p,i).^(2.* (c1*lambda(p,2) + ...
17            c2*lambda(p,1) + c3(:,i)) ...
18            + c4(:,i)*lam123;
19        % \zeta
20        base(:,6+i) = lambda(p,i).^(2.* (d1*lambda(p,2) + ...
21            d2*lambda(p,1) + d3(:,i)) ...
22            + d4(:,i)*lam123;
23    end
24    % Second stiffness matrix
25    for i = 1:Ndof
26        j = 1:Ndof; jd = (i-1)*Ndof+1:i*Ndof;
27        gs = cf(pxy).*base(:,i).*base(:,j);

```

```

26         G(:,jd) = G(:,jd) + weight(p)*gs;
27     end
28 % load vector
29 F = F + weight(p)*f(pxy).*base;
30 end
31 G = area.*G; F = area.*F;

```

这里, c_i 和 d_i 是基函数的系数, 如下

```

1 % coefficients in the basis functions
2 c1 = xi(:,1); d1 = eta(:,1);
3 c2 = -xi(:,2); d2 = -eta(:,2);
4 c3 = -[c2,c1,zeros(NT,1)]; d3 = -[d2,d1,zeros(NT,1)];
5 c4 = [0.5*c1-c2, 0.5*c2-c1, 0.5*(c1+c2)];
6 d4 = [0.5*d1-d2, 0.5*d2-d1, 0.5*(d1+d2)];

```

最终如下装配

```

1 % ----- Assemble stiffness matrix and load vector -----
2 kk = sparse(ii,jj,K(:)+G(:),3*N,3*N);
3 ff = accumarray(elem2(:), F(:), [3*N 1]);

```

6.3.5 边界条件的处理

假设直接给出边界上对应自由度的值, 则按照 Dirichlet 边界条件处理即可.

```

1 % ----- Dirichlet boundary conditions -----
2 eD = bdStruct.eD;
3 id = [eD; eD+N; eD+2*N];
4 isBdDof = false(3*N,1); isBdDof(id) = true;
5 bdDof = find(isBdDof); freeDof = find(~isBdDof);
6 g_D = pde.g_D; pD = node(eD,:); Dw = pde.Dw;
7 wD = g_D(pD); Dw = Dw(pD); %wxD = Dw(:,1); wyD = Dw(:,2);
8 w = zeros(3*N,1); w(bdDof) = [wD; Dw(:)];
9 ff = ff - kk*w;
10 % ----- Solver -----
11 w(freeDof) = kk(freeDof,freeDof)\ff(freeDof);
12 w = w(1:N);

```

数值结果与程序不再给出, 主程序为 main_PlateBending_Zienkiewicz.m, 函数文件为 PlateBendingZienkiewicz.m.

6.4 非协调 Adini 元

Adini 元是不完全双三次矩形元, 它是 C^0 连续的. 工程中通常称为 Adini-Clough-Melosh 元, 简称 ACM 元. 本文称为 Adini 元.

6.4.1 Adini 元的构造

设矩阵 $\beta = (\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4)$, $\delta_i = (x_i, y_i)$, 它的长宽平行于坐标轴. 自由度为

$$w(\delta_i) = w_i, \quad \frac{\partial w}{\partial x}(\delta_i) = w_{xi}, \quad \frac{\partial w}{\partial y}(\delta_i) = w_{yi}, \quad i = 1, 2, 3, 4.$$

完全三次多项式有 16 个自由度, 去掉其中 4 个高阶项

$$x^3y^3, \quad x^3y^2, \quad x^2y^3, \quad x^2y^2,$$

即可构造 12 个自由度的多项式. 显然形函数空间可写为

$$\mathcal{P} = \mathbb{P}_2 \oplus \{x^3y, \ xy^3\}.$$

做坐标变换

$$\begin{cases} \xi = \frac{2}{a}(x - x_0), & x_0 = \frac{1}{2}(x_1 + x_2), & a = x_2 - x_1, \\ \eta = \frac{2}{b}(y - y_0), & y_0 = \frac{1}{2}(y_1 + y_4), & b = y_4 - y_1, \end{cases}$$

矩形 β 变为参考元 $[-1, 1]^2$, 相应的四个顶点为

$$(\xi_1, \eta_1) = (-1, -1), \quad (\xi_2, \eta_2) = (1, -1), \quad (\xi_3, \eta_3) = (1, 1), \quad (\xi_4, \eta_4) = (-1, 1).$$

在 ξ, η 坐标下, 基函数为

$$\begin{cases} \varphi_i(\xi, \eta) = \frac{1}{8} (1 + \xi_i \xi) (1 + \eta_i \eta) (2 + \xi_i \xi + \eta_i \eta - \xi^2 - \eta^2), \\ \psi_i(\xi, \eta) = -\frac{1}{16} a \xi_i (1 + \xi_i \xi) (1 + \eta_i \eta) (1 - \xi^2), \\ \zeta_i(\xi, \eta) = -\frac{1}{16} b \eta_i (1 + \xi_i \xi) (1 + \eta_i \eta) (1 - \eta^2). \end{cases}$$

简单计算知, 二阶导数为

$$\begin{cases} \partial_{11}\varphi_i = -\frac{3}{a^2} \xi_i \xi (1 + \eta_i \eta) \\ \partial_{22}\varphi_i = -\frac{3}{b^2} \eta_i \eta (1 + \xi_i \xi) \\ \partial_{12}\varphi_i = \frac{1}{2ab} \xi_i \eta_i [4 - 3(\xi^2 + \eta^2)] \end{cases}, \quad i = 1, 2, 3, 4,$$

$$\begin{cases} \partial_{11}\psi_i = \frac{1}{2a}(1 + \eta_i\eta)(\xi_i + 3\xi) \\ \partial_{22}\psi_i = 0 \\ \partial_{12}\psi_i = -\frac{1}{4b}\eta_i(1 - 2\xi_i\xi - 3\xi^2) \end{cases}, \quad i = 1, 2, 3, 4,$$

$$\begin{cases} \partial_{11}\zeta_i = 0 \\ \partial_{22}\zeta_i = \frac{1}{2b}(1 + \xi_i\xi)(\eta_i + 3\eta) \\ \partial_{12}\zeta_i = -\frac{1}{4a}\xi_i(1 - 2\eta_i\eta - 3\eta^2) \end{cases}, \quad i = 1, 2, 3, 4.$$

注 6.4 Adini 元与 Zienkiewicz 元的自由度形式一样, `sparse` 装配指标完全相同.

6.4.2 刚度矩阵和载荷向量的计算

与三角形不同的是, 现在是转换到参考矩形 $[-1, 1]^2$ 上, 易知

$$\int_{\beta} f(x, y) dx dy = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \tilde{f}(\xi, \eta) |J| d\xi d\eta, \quad |J| = \frac{ab}{4}.$$

设 $[-1, 1]$ 上的 Gauss 点和权重为 $r_i, w_i, i = 1, \dots, n$, 则二重积分如下计算

$$\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 f(\xi, \eta) d\xi d\eta = \sum_{i,j=1}^n w_i w_j f(r_i, r_j).$$

具体计算时, 权重 $\{w_i w_j\}$ 将拉直为一个向量, 记为 `weight`, 相应的积分点的横纵坐标分别记为 `xi` 和 `eta`. 如下实现

```

1 % quadrature points
2 [xx,ww] = quadpts1(5); nr = length(ww); nI = nr^2;
3 xi = reshape(repmat(xx',nr,1),1,[]);
4 eta = reshape(ones(nr,1)*xx,1,[]);
5 weight = reshape(ww'*ww,1,[]);

```

所有矩形的边长为

```

1 xiv = [-1 1 1 -1]; etav = [-1 -1 1 1]; % vertices of [-1,1]^2
2 x1 = node(elem(:,1),1); y1 = node(elem(:,1),2);
3 x2 = node(elem(:,2),1); y4 = node(elem(:,4),2);
4 a = x2-x1; b = y4-y1;

```

基函数的二阶导数类似 Zienkiewicz 元存储为三维数组, 且如下计算

```

1 % ----- second derivatives of basis functions -----
2 b11 = zeros(NT,Ndof,nI); b22 = b11; b12 = b11;
3 for i = 1:4

```

```

4    % \phi
5    b11(:,i,:) = -3./a.^2*xiv(i)*xi.*(1+etav(i)*eta);
6    b22(:,i,:) = -3./b.^2*etav(i)*eta.*(1+xiv(i)*xi);
7    b12(:,i,:) = 1./(2*a.*b)*xiv(i)*etav(i)*(4-3*(xi.^2+eta.^2));
8    % \psi
9    b11(:,4+i,:) = 1./(2*a)*(1+etav(i)*eta).*(xiv(i)+3*xi);
10   b22(:,4+i,:) = 0;
11   b12(:,4+i,:) = -1./(4*b)*etav(i)*(1-2*xiv(i)*xi-3*xi.^2);
12   % \zeta
13   b11(:,8+i,:) = 0;
14   b22(:,8+i,:) = 1./(2*b)*(1+xiv(i)*xi).*(etav(i)+3*eta);
15   b12(:,8+i,:) = -1./(4*a)*xiv(i)*(1-2*etav(i)*eta-3*eta.^2);
16 end

```

双线性形式的第一部分也类似 Zienkiewicz 计算, 只不过积分点换成矩形的而已.

```

1 % ----- First stiffness matrix -----
2 K = zeros(NT,Ndof^2);
3 for i = 1:Ndof
4     j = 1:Ndof; jd = (i-1)*Ndof+1:i*Ndof;
5     for p = 1:nI
6         Kp = b11(:,i,p).*b11(:,j,p) + b22(:,i,p).*b22(:,j,p) ...
7             + nu*(b11(:,i,p).*b22(:,j,p) + b22(:,i,p).*b11(:,j,p)) ...
8             + 2*(1-nu)*b12(:,i,p).*b12(:,j,p);
9         K(:,jd) = K(:,jd) + weight(p)*Kp;
10    end
11 end
12 K = D*(a.*b)./4.*K;

```

第二部分与载荷向量如下计算

```

1 % ----- Second stiffness matrix and load vector -----
2 G = zeros(NT,Ndof^2); F = zeros(NT,Ndof);
3 if isnumeric(para.c), cf = @ (xy) para.c+0*xy(:,1); end
4 x0 = (x1+x2). / 2; y0 = (y1+y4). / 2;
5 for p = 1:nI
6     % quadrature points in the x-y coordinate
7     x = a*xip(p)/2 + x0; y = b*etap(p)/2 + y0;
8     pxy = [x,y];
9     % basis functions at the p-th quadrature point
10    base = zeros(NT,Ndof);

```

```

11      for i = 1:4
12          tp = (1+xiv(i)*xi(p))*(1+etav(i)*eta(p));
13          % \phi
14          base(:,i) = ...
15              1/8*tp*(2+xiv(i)*xi(p)+etav(i)*eta(p)-xi(p)^2-eta(p)^2);
16          % \psi
17          base(:,4+i) = -1/16*a*xiv(i)*tp*(1-xi(p)^2);
18          % \zeta
19          base(:,8+i) = -1/16*b*etav(i)*tp*(1-eta(p)^2);
20      end
21      % Second stiffness matrix
22      for i = 1:Ndof
23          j = 1:Ndof; jd = (i-1)*Ndof+1:i*Ndof;
24          gs = cf(pxy).*base(:,i).*base(:,j);
25          G(:,jd) = G(:,jd) + weight(p)*gs;
26      end
27      % load vector
28      F = F + weight(p)*f(pxy).*base;
29  end
30 G = (a.*b)./4.*G; F = (a.*b)./4.*F;

```

装配和边界条件处理与 Zienkiewicz 元完全相同. 数值结果与程序不再给出, 见 GitHub 上传文件. 主程序为 main_PlateBending_Adini.m, 函数文件为 PlateBendingAdini.m.

6.5 双调和方程的混合元方法

6.5.1 混合元的变分问题

考虑问题

$$\begin{cases} \Delta^2 u = f & \text{in } \Omega \subset \mathbb{R}^2, \\ u = \partial_n u = 0 & \text{on } \partial\Omega. \end{cases}$$

令 $w = -\Delta u$ (通常称 u 为流函数, w 为涡函数), 则

$$\begin{cases} -\Delta u = w, \\ -\Delta w = f, \\ u = \partial_n u = 0 & \text{on } \partial\Omega, \end{cases}$$

于是有混合变分问题: 找 $(w, u) \in H^1(\Omega) \times H_0^1(\Omega)$ 使得

$$\begin{cases} \int_{\Omega} \nabla u \cdot \nabla \phi dx = \int_{\Omega} w \phi dx, & \phi \in H^1(\Omega), \\ \int_{\Omega} \nabla w \cdot \nabla \psi dx = \int_{\Omega} f \psi dx, & \psi \in H_0^1(\Omega). \end{cases} \quad (6.6)$$

令

$$a(w, \phi) = - \int_{\Omega} w \phi dx, \quad b(\phi, u) = \int_{\Omega} \nabla \phi \cdot \nabla u dx,$$

则

$$\begin{cases} a(w, \phi) + b(\phi, u) = 0, & \phi \in H^1(\Omega), \\ b(w, \psi) = (f, \psi), & \psi \in H_0^1(\Omega). \end{cases}$$

注意, 若令 $V = H^1(\Omega)$, $U = H_0^1(\Omega)$, 则

$$a(\cdot, \cdot) : V \times V \rightarrow \mathbb{R}, \quad b(\cdot, \cdot) : V \times U \rightarrow \mathbb{R}.$$

对 u, w , 以下均采用线性元近似. 现在考察其刚度矩阵和载荷向量. 设 N 是单元上节点基函数的行向量, 则有

$$\begin{cases} \boldsymbol{\phi}^T A \mathbf{w} + \boldsymbol{\phi}^T B \mathbf{u} = 0, \\ \boldsymbol{\psi}^T B^T \mathbf{w} = \boldsymbol{\psi}^T \mathbf{f}, \end{cases}$$

式中,

$$A = - \int_K N^T N dx, \quad B = \int_K \nabla N^T \cdot \nabla N dx, \quad \mathbf{f} = \int_K N^T f dx.$$

此即,

$$\begin{bmatrix} A & B \\ B^T & O \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{w} \\ \mathbf{u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{f} \end{bmatrix}.$$

总体方程组也是该形式.

注 6.5 若 $\partial_n u$ 不为零, 则混合变分形式为

$$\begin{cases} a(w, \phi) + b(\phi, u) = \int_{\partial\Omega} \partial_n u \phi ds, & \phi \in H^1(\Omega), \\ b(w, \psi) = (f, \psi), & \psi \in H_0^1(\Omega). \end{cases}$$

现在 $\partial_n u$ 成为 u 对应的 Neumann 边界条件, 贡献在第一行方程中.

6.5.2 装配指标

类似线弹性问题, 我们分块进行装配, 以方便运用向量运算. 装配指标为

1 % ----- sparse assembling index -----

```

2 nnz = NT*Ndof^2; % Ndof = 3
3 ii = zeros(nnz,1); jj = zeros(nnz,1);
4 id = 0;
5 for i = 1:Ndof
6     for j = 1:Ndof
7         ii(id+1:id+NT) = elem(:,i); % zi
8         jj(id+1:id+NT) = elem(:,j); % zj
9         id = id + NT;
10    end
11 end
12
13 ii11 = ii; jj11 = jj; ii12 = ii; jj12 = jj+N;
14 ii21 = ii+N; jj21 = jj;

```

这里第 4 块为零, 不需要给出.

载荷向量的第二部分为零, 只需要如下装配

```
1 ff = accumarray(elem(:)+N, F(:, [2*N 1]));
```

6.5.3 刚度矩阵的计算

矩阵 A, B 的计算都是标准的, 直接给出.

```

1 % ----- Stiffness matrix B -----
2 % B: (Dphi_i, Dphi_j)_K
3 [Dphi, area] = gradbasis(node, elem);
4 B = zeros(NT, Ndof^2);
5 for i = 1:Ndof
6     j = 1:Ndof; jd = (i-1)*Ndof+1:i*Ndof;
7     B(:, jd) = sum(Dphi(:,:,i).*Dphi(:,:,j), 2).*area;
8 end
9
10 % ----- Stiffness matrix A and load vector -----
11 % Gauss quadrature rule
12 [lambda, weight] = quadpts(3); nI = length(weight);
13 % A: -(phi_i, phi_j)_K
14 A = zeros(NT, Ndof^2); F = zeros(NT, Ndof);
15 for p = 1:nI
16     % quadrature points in the x-y coordinate
17     pxy = lambda(p, 1)*node(elem(:, 1), :) ...
18         + lambda(p, 2)*node(elem(:, 2), :) ...

```

```

19         + lambda(p,3)*node(elem(:,3),:);
20 % Second stiffness matrix
21 for i = 1:Ndof
22     j = 1:Ndof; jd = (i-1)*Ndof+1:i*Ndof;
23     gs = lambda(p,i).*lambda(p,j);
24     A(:,jd) = A(:,jd) + weight(p)*gs;
25 end
26 % load vector
27 F = F + weight(p)*pde.f(pxy)*lambda(p,:);
28 end
29 A = -area.*A; F = area.*F;
30
31 % ----- Assemble stiffness matrix and load vector -----
32 ss11 = A(:,); ss12 = B(:,); B1 = B(:,[1 4 7 2 5 8 3 6 9]);
33 ss21 = B1(:,);
34 ii = [ii11; ii12; ii21];
35 jj = [jj11; jj12; jj21];
36 ss = [ss11; ss12; ss21];
37 kk = sparse(ii,jj,ss,2*N,2*N);
38
39 ff = accumarray(elem(:)+N, F(:,[2*N 1]));

```

边界条件的处理是熟悉的, 略 (但要注意 Neumann 对应第一行方程). 数值结果及程序见 GitHub 上传文件, 主函数为 main_biharmonicMixedFEM.m, 函数文件为 biharmonicMixedFEM.m. 用到的数据文件为 biharmonicdata.m.

第七章 标量有限元的基于变分形式的有限元程序设计

FreeFem++ 是一款非常优秀的有限元分析软件, 它的一大亮点是编程过程与变分形式一一对应, 本文称为“基于变分形式的编程”. 这种处理方式通常使用面向对象的语言, 程序组织以及阅读起来都非常困难. 笔者曾一度想学习面向对象编程, 但最终还是放弃了. 一方面对 C++ 不是很熟悉, 另一方面也没有太多精力. 对有限元编程过程的再思考之后, 我觉得也可以用面向过程的语言写出基于变分形式的程序. 其实本质在于处理各种典型的双线性形式以及线性形式的基函数配对的积分.

7.1 程序的设计思路

7.1.1 变分形式与程序的对应

考虑如下的一般问题

$$\begin{cases} -\nabla \cdot (a \nabla u) + cu = f & \text{in } \Omega, \\ u = g_D & \text{on } \Gamma_D, \\ g_R u + a \partial_n u = g_N & \text{on } \Gamma_R, \end{cases}$$

设区域 $\Omega = (0, 1)^2$, 且右侧对应 Γ_R , 其他都为 Γ_D . 相关 pde 数据见 Poissondata2.m.

对齐次 Dirichlet 边界条件, 变分问题为: 找 $u \in V := H_0^1(\Omega)$ 使得

$$a(u, v) = \ell(v), \quad v \in V,$$

式中,

$$\begin{aligned} a(u, v) &= \int_{\Omega} a \nabla u \cdot \nabla v d\sigma + \int_{\Omega} c u v d\sigma + \int_{\Gamma_R} g_R u v ds, \\ \ell(v) &= \int_{\Omega} f v d\sigma + \int_{\Gamma_R} g_N v ds. \end{aligned}$$

先考虑双线性形式. 第一步是获得区域上双线性形式

$$\int_{\Omega} a \nabla u \cdot \nabla v d\sigma + \int_{\Omega} c u v d\sigma$$

对应的刚度矩阵, 程序模式如下

```
1 % Omega
2 Coef  = {pde.a, pde.c};
3 Trial = {'u.grad', 'u.val'};
4 Test  = {'v.grad', 'v.val'};
5 kk   = int2d(Th,Coef,Trial,Test,feSpace,quadOrder);
```

这里, 我们设置了三元组 $(\text{Coef}, \text{Trial}, \text{Test})$, 分别对应变分形式中的系数、试探函数和检验函数. 注意, 双线性形式三元组的元素始终用大括号括起来, 即便只有一个元素的对应. int2d 计算二维区域上双线性形式对应的刚度矩阵, 即

$$A = (a_{ij}), \quad a_{ij} = a(\Phi_j, \Phi_i),$$

其中的 Φ_i 是有限元空间 feSpace 的整体节点基. 双线性形式的积分, 如

$$\int_{\Omega} \nabla \Phi_j \cdot \nabla \Phi_i dx$$

将采用 Gauss 积分公式进行近似计算, quadOrder 即为 Gauss 积分的阶.

接着是实现边界上的双线性形式

$$\int_{\Gamma_R} g_R u v ds$$

对应的刚度矩阵, 程序模式如下

```

1 % Gamma_R
2 Coef   = {pde.g_R};
3 Trial  = {'u.val'};
4 Test   = {'v.val'};
5 kk    = kk + int1d(Th, Coef, Trial, Test, feSpace, quadOrder);

```

这里, int1d 计算一维单形剖分上双线性形式对应的刚度矩阵. 当然它的维数与区域上一致.

再考虑右端的线性形式, 它也分为两部分. 第一步是实现区域上线性形式

$$\int_{\Omega} f v d\sigma$$

对应的载荷向量, 程序模式如下

```

1 % Omega
2 Coef = pde.f;  Test = 'v.val';
3 ff   = int2d(Th, Coef, [], Test, feSpace, quadOrder);

```

线性形式一般都是上面的形式, 为此, 这里没有考虑多个组份, 从而 $v.\text{val}$ 没有用元胞数组存储. 第二步是实现边界上线性形式

$$\int_{\Gamma_R} g_N v ds$$

对应的载荷向量, 程序模式如下

```

1 % Gamma_R
2 Coef = g_N;  Test = 'v.val';
3 ff   = ff + int1d(Th, Coef, [], Test, feSpace, quadOrder);

```

7.1.2 网格信息 Th

我们定义一个结构体 Th, 用以存储网格的相关信息. 首先, 它应该包含基本数据结构 node 和 elem:

```
1 Th.node = node; Th.elem = elem;
```

我们总假设边界分为两部分, 即 Dirichlet 和 Neumann 边界, 这里 Neumann 可以是一般的 Robin 边界 (只是符号而已).

对 Dirichlet 边界条件, 我们要用到 Dirichlet 边界的顶点序号. 而且对高阶元, 例如二阶 Lagrange 元, 我们需要添加边中点自由度, 它对应的序号由边的序号获得. 为此, 我们实际上还需要给定 Dirichlet 边的序号.

对 Neumann 边界条件或边界积分, 我们需要 Neumann 边界的连通性信息. 当然对高阶元, 我们也要知道这些边的序号.

所有涉及到边的信息都可由函数 setboundary.m 获得, 存储在结构体 bdStruct 中, 它包含如下信息:

```
1 bdStruct.elemD = bdEdge(bdFlag,:); % Dirichlet boundary edges
2 bdStruct.elemN = bdEdge(~bdFlag,:); % Neumann boundary edges
3 bdStruct.eD = unique(bdEdge(bdFlag,:)); % Dirichlet boundary nodes
4 bdIndex = find(s==1); % indices of all boundary edges
5 bdStruct.bdIndex = bdIndex;
6 bdStruct.bdIndexD = bdIndex(bdFlag); % indices of Dirichelt ...
    boundary edges
7 bdStruct.bdIndexN = bdIndex(~bdFlag); % indices of Neumann boundary ...
    edges
```

为此, Th 还新增第三个域: Th.bdStruct = bdStruct.

对一维积分, 它的积分区域一般为 Neumann 边界或整个边界, 为此我们新增第四个域: Th.elem1D = elem1D, 其中 elem1D 是一维积分的单元连通信息. 当然我们有时候会需要相应边的序号, 记为 bdIndex1D. 这样, 我们新增第五个域: Th.bdIndex1D = bdIndex1D. 注意, 后者在一维问题中一般不需要.

在装配过程中, 我们需要前面介绍过的辅助数据结构. 为此, 我们还新增域 Th.auxT, 其中的 auxT 由 auxstructure.m 生成. 如果有需要的话, 我们还添加 auxgeomerty.m 生成的几何数据 aux.

注 7.1 以上信息不一定都存储, 视问题而定. 通常我们是在程序某个组块的内部新增, 而不一定一开始就给出.

7.2 int2d 函数

7.2.1 变分形式的计算

考虑仅含有一阶导的双线性形式, 有如下组合

$$\begin{aligned} & \int_K a u v dx, \quad \int_K a u v_x dx, \quad \int_K a u v_y dx, \\ & \int_K a u_x v dx, \quad \int_K a u_x v_x dx, \quad \int_K a u_x v_y dx, \\ & \int_K a u_y v dx, \quad \int_K a u_y v_x dx, \quad \int_K a u_y v_y dx, \end{aligned}$$

当然我们经常用到梯度形式

$$\int_{\Omega} a \nabla u \cdot \nabla v dx = \int_{\Omega} a(u_x v_x + u_y v_y) dx.$$

以第二个双线性形式为例, 为了方便对应, 把检验函数写在前面, 即令

$$a_K(v, u) = \int_K a v_x u dx.$$

考虑一阶 Lagrange 有限元, 设局部节点基为 ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 , 则单元矩阵为

$$[K^e] = \int_K a \begin{bmatrix} \partial_x \phi_1 \\ \partial_x \phi_2 \\ \partial_x \phi_3 \end{bmatrix} [\phi_1, \phi_2, \phi_3] dx.$$

记

$$v_1 = \partial_x \phi_1, \quad v_2 = \partial_x \phi_2, \quad v_3 = \partial_x \phi_3; \quad u_1 = \phi_1, \quad u_2 = \phi_2, \quad u_3 = \phi_3,$$

则

$$[K^e] = (k_{ij})_{3 \times 3}, \quad k_{ij} = \int_K a v_i u_j dx.$$

根据数值积分的说明, 积分可如下计算

$$k_{ij} = \int_K a v_i u_j dx = |K| \sum_{p=1}^{n_G} w_p v_i(x_p, y_p) u_j(x_p, y_p), \quad (7.1)$$

其中, (x_p, y_p) 是第 p 个 Gauss 积分点. 为了避免单元循环, 对固定的 p , 我们先一次性算出所有单元的第 p 个和项, 即

$$w_p \begin{bmatrix} v_i u_j|_{(x_p^1, y_p^1)} \\ v_i u_j|_{(x_p^2, y_p^2)} \\ \vdots \\ v_i u_j|_{(x_p^{NT}, y_p^{NT})} \end{bmatrix},$$

然后对 p 循环求和并将每行对应乘以单元面积即可 (事实上, 后面我们一次性生成所有积分节点处的). 为此, 我们可事先给出

$$w_p, \begin{bmatrix} v_i|_{(x_p^1, y_p^1)} \\ v_i|_{(x_p^2, y_p^2)} \\ \vdots \\ v_i|_{(x_p^{NT}, y_p^{NT})} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} u_j|_{(x_p^1, y_p^1)} \\ u_j|_{(x_p^2, y_p^2)} \\ \vdots \\ u_j|_{(x_p^{NT}, y_p^{NT})} \end{bmatrix}, \quad p = 1, \dots, n_G.$$

下面考虑 $v_i = \partial_x \phi_i$, $u_j = \phi_j$ 的计算程序. 设 i, j, k 表示 1,2,3 的轮换. 定义

$$\xi_i = x_j - x_k, \quad \eta_i = y_j - y_k, \quad \omega_i = x_j y_k - x_k y_j,$$

则三角形的有向面积可表示为

$$S = \frac{1}{2} \det \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} (\xi_1 \eta_2 - \xi_2 \eta_1) = \omega_1 \omega_2 \omega_3,$$

如下计算

```

1 z1 = node(elem(:,1),:); z2 = node(elem(:,2),:); z3 = node(elem(:,3),:);
2 xi = [z2(:,1)-z3(:,1), z3(:,1)-z1(:,1), z1(:,1)-z2(:,1)];
3 eta = [z2(:,2)-z3(:,2), z3(:,2)-z1(:,2), z1(:,2)-z2(:,2)];
4 area = 0.5*(xi(:,1).*eta(:,2)-xi(:,2).*eta(:,1));

```

基函数的表达式为

$$\phi_i(x, y) = \lambda_i(x, y) = \frac{1}{2S} (\eta_i x - \xi_i y + \omega_i), \quad i = 1, 2, 3,$$

显然有

$$\frac{\partial}{\partial x} \phi_i(x, y) = \frac{1}{2S} \eta_i, \quad \frac{\partial}{\partial y} \phi_i(x, y) = -\frac{1}{2S} \xi_i.$$

所有单元检验函数值如下

```

1 % test function
2 v1 = eta(:,1)./(2*area);
3 v2 = eta(:,2)./(2*area);
4 v3 = eta(:,3)./(2*area);

```

注意一阶导数是常数, 在所有积分点处的值是相同的, 为此我们直接复制 n_g 列.

```

1 % test function
2 v1 = -xi(:,1)./(2*area); v1 = repmat(v1, 1, ng);
3 v2 = -xi(:,2)./(2*area); v2 = repmat(v2, 1, ng);
4 v3 = -xi(:,3)./(2*area); v3 = repmat(v3, 1, ng);

```

这样, v_i 是一个矩阵, 每行对应一个单元, 每列对应一个积分点.

测试函数 $u_i = \phi_i$ 如下计算

```
1 % trial function
2 u1 = repmat(lambda(:,1)',NT,1);
3 u2 = repmat(lambda(:,2)',NT,1);
4 u3 = repmat(lambda(:,3)',NT,1);
```

注意, 这里 λ 的第 i 列对应 λ_i 的所有积分点值, 转置复制 NT 行就是所有单元的. 此时, u_j 每行对应一个单元, 每列对应一个积分点. 另外, iFEM 中权重 $weight$ 的维数未统一, 前面的若干个是行向量, 而后面的则是列向量, 这里统一修改为行向量.

先不考虑系数函数. 按照装配的规定, k_{ij} 如下排列

$$K = [k_{11}, k_{12}, k_{13}, k_{21}, k_{22}, k_{23}, k_{31}, k_{32}, k_{33}],$$

其中每个 k_{ij} 是一列向量, 对应所有单元的结果. 记 v_i 与 u_j 点乘后所得矩阵为 k_{ij} , 它的每行对应一个单元, 而每列恰好对应积分公式 (7.1) 右端的一个求和项, 只不过未乘以权重. 对应矩阵 k_{ij} , 我们可获得权重矩阵

```
1 ww = repmat(weight,NT,1);
```

注意权重 $weight$ 是一行向量, 列对应积分点. 复制 NT 行就是所有单元的结果. 这样, 将 ww 和 k_{ij} 点乘, 然后按行求和就是 (7.1) 右端的求和结果.

```
1 k11 = sum(ww.*v1.*u1,2);
2 k12 = sum(ww.*v1.*u2,2);
3 k13 = sum(ww.*v1.*u3,2);
4 k21 = sum(ww.*v2.*u1,2);
5 k22 = sum(ww.*v2.*u2,2);
6 k23 = sum(ww.*v2.*u3,2);
7 k31 = sum(ww.*v3.*u1,2);
8 k32 = sum(ww.*v3.*u2,2);
9 k33 = sum(ww.*v3.*u3,2);
10 K = [k11,k12,k13, k21,k22,k23, k31,k32,k33];
```

最后, 每行还要乘以面积

```
1 Ndof = 3;
2 K = repmat(area,1,Ndof^2).*K;
```

当然为了方便, 上面的过程可用一个简单的循环实现.

```

1 K = zeros(NT,Ndof^2); s = 1;
2 v = {v1,v2,v3}; u = {u1,u2,u3};
3 for i = 1:Ndof
4     for j = 1:Ndof
5         vi = v{i}; uj = u{j};
6         K(:,s) = area.*sum(ww.*vi.*uj,2);
7         s = s+1;
8     end
9 end

```

接着, 我们加上积分前的系数, 例如取 $a(x, y) = x + y$. 根据上面的说明, 只要获得类似 v_i 或 u_j 这样的系数矩阵即可, 它的每行对应一个单元, 每列对应一个积分点. 对第 p 个和项, 所有单元的积分点坐标 pz 如下

```

1 pz = lambda(p,1)*z1 + lambda(p,2)*z2 + lambda(p,3)*z3;

```

系数矩阵如下

```

1 cf = @(pz) pz(:,1) + pz(:,2); % x+y;
2 cc = zeros(NT,ng);
3 for p = 1:ng
4     pz = lambda(p,1)*z1 + lambda(p,2)*z2 + lambda(p,3)*z3;
5     cc(:,p) = cf(pz);
6 end

```

规定: 所有系数函数均采用向量型变量. 这样, 前面的循环可修改为

```

1 K = zeros(NT,Ndof^2); s = 1;
2 v = {v1,v2,v3}; u = {u1,u2,u3};
3 for i = 1:Ndof
4     for j = 1:Ndof
5         vi = v{i}; uj = u{j};
6         K(:,s) = area.*sum(ww.*cc.*vi.*uj,2);
7         s = s+1;
8     end
9 end

```

现在考虑一个常用情形, 即

$$\int_{\Omega} a \nabla u \cdot \nabla v dx = \int_{\Omega} a(u_x v_x + u_y v_y) dx.$$

这种向量式的积分也可类似前面处理. 设 $\vec{v}_i = [\partial_x \phi_i, \partial_y \phi_i]$, $\vec{u}_j = [\partial_x \phi_j, \partial_y \phi_j]$, 则

$$w_p \cdot (\vec{v}_i \cdot \vec{u}_j) = w_p \partial_x \phi_i \partial_x \phi_j + w_p \partial_y \phi_i \partial_y \phi_j. \quad (7.2)$$

基函数的梯度如下计算

```

1 grad1 = [eta(:,1), -xi(:,1)] ./ repmat(2*area, 1, 2);
2 grad2 = [eta(:,2), -xi(:,2)] ./ repmat(2*area, 1, 2);
3 grad3 = [eta(:,3), -xi(:,3)] ./ repmat(2*area, 1, 2);
4 grad1 = repmat(grad1, 1, nG);
5 grad2 = repmat(grad2, 1, nG);
6 grad3 = repmat(grad3, 1, nG);

```

这里, 梯度也复制了 n_g 列, 从而 gradi 有 $2n_g$ 列. 记 $v_i = \text{gradi}$, $u_j = \text{gradj}$, 令 $k_{ij} \dots = v_i \cdot u_j$, 则给出的矩阵是梯度分量点乘的结果. 由 (7.2), 梯度分量的乘积都要乘以权重, 为此将权重对应 k_{ij} 处理获得权重矩阵.

```

1 ww = zeros(1, 2*ng);
2 ww(1:2:end) = weight; ww(2:2:end) = weight;
3 ww = repmat(ww, NT, 1);

```

而

$$w_p \cdot (a\vec{v}_i \cdot \vec{u}_j) = w_p a \partial_x \phi_i \partial_x \phi_j + w_p a \partial_y \phi_i \partial_y \phi_j,$$

系数矩阵可类似权重处理.

```

1 cgrad = ones(NT, 2*ng);
2 cgrad(:, 1:2:end) = cc; cgrad(:, 2:2:end) = cc; cc = cgrad;
3 for i = 1:Ndof
4     for j = 1:Ndof
5         vi = v{i}; uj = u{j};
6         K(:, s) = area.*sum(ww.*cgrad.*vi.*uj, 2);
7         s = s+1;
8     end
9 end

```

7.2.2 变分形式的程序设计

我们先给出基函数, 基函数导数及梯度的程序, 命名为 Lagrange_base_2D.m, 程序如下

```

1 function w = Base2D(wStr, node, elem, feSpace, quadOrder)
2

```

```

3 if nargin == 3, feSpace = [] ; quadOrder = 3; end % default: P1
4 if nargin == 4, quadOrder = 3; end
5
6 wStr = lower(wStr); % lowercase string
7 NT = size(elem,1);
8
9 % area
10 z1 = node(elem(:,1),:); z2 = node(elem(:,2),:); z3 = node(elem(:,3),:);
11 xi = [z2(:,1)-z3(:,1), z3(:,1)-z1(:,1), z1(:,1)-z2(:,1)];
12 eta = [z2(:,2)-z3(:,2), z3(:,2)-z1(:,2), z1(:,2)-z2(:,2)];
13 area = 0.5*(xi(:,1).*eta(:,2)-xi(:,2).*eta(:,1));
14
15 % Gauss quadrature rule
16 [lambda,weight] = quadpts(quadOrder); nG = length(weight);
17
18 % gradbasis
19 Dlambdax = eta./repmat(2*area,1,3);
20 Dlambday = -xi./repmat(2*area,1,3);
21 Dlambda1 = [Dlambdax(:,1), Dlambday(:,1)];
22 Dlambda2 = [Dlambdax(:,2), Dlambday(:,2)];
23 Dlambda3 = [Dlambdax(:,3), Dlambday(:,3)];
24
25 %% P1-Lagrange
26 if strcmpi(feSpace, 'P1') || isempty(feSpace)
27 % u.val
28 if contains(wStr, '.val')
29     w1 = repmat(lambda(:,1)',NT,1); % phi1 at zp, p = 1,2, ...
30     w2 = repmat(lambda(:,2)',NT,1);
31     w3 = repmat(lambda(:,3)',NT,1);
32 end
33 % u.dx
34 if contains(wStr, '.dx')
35     w1 = Dlambdax(:,1); w1 = repmat(w1,1,nG);
36     w2 = Dlambdax(:,2); w2 = repmat(w2,1,nG);
37     w3 = Dlambdax(:,3); w3 = repmat(w3,1,nG);
38 end
39 % u.dy
40 if contains(wStr, '.dy')
41     w1 = Dlambday(:,1); w1 = repmat(w1,1,nG);
42     w2 = Dlambday(:,2); w2 = repmat(w2,1,nG);

```

```

43         w3 = Dlambday(:,3);   w3 = repmat(w3,1,nG);
44     end
45     % u.grad
46     if contains(wStr,'.grad')
47         w1 = Dlambdai;   w1 = repmat(w1,1,nG);
48         w2 = Dlambdai2; w2 = repmat(w2,1,nG);
49         w3 = Dlambdai3; w3 = repmat(w3,1,nG);
50     end
51
52     w = {w1,w2,w3};
53 end

```

这里, `contains(wStr,'.val')` 的意思是, 若 `wStr` 对应的字符串含有 `.val`, 则执行相应语句. 根据前面的说明, 基函数一般有 `u.val`, `u.dx`, `u.dy`, `u.grad` 等形式, 分别对应函数值和所有一阶导数值.

双线性形式的调用语法如下

```

1 % string
2 cf1 = @(pz) 1+0*pz(:,1); cf2 = @(pz) 1+0*pz(:,1);
3 Coef = {cf1, cf2};
4 Trial = {'u.grad', 'u.val'};
5 Test = {'v.grad', 'v.val'};
6 kk = int2d(Th,Coef,Trial,Test);

```

函数 `int2d.m` 的内容与有限元程序的过程基本一致, 安排如下. 首先是必要的信息, 如

```

1 function output = int2d(Th,Coef,Trial,Test,feSpace,quadOrder)
2
3 if nargin == 4, feSpace = []; quadOrder = 3; end % default: P1
4 if nargin == 5, quadOrder = 3; end
5
6 node = Th.node; elem = Th.elem;
7 NT = size(elem,1);
8
9 % Guass-Quadrature
10 [lambda,weight] = quadpts(quadOrder); nG = length(weight);
11 % area
12 z1 = node(elem(:,1),:); z2 = node(elem(:,2),:); z3 = node(elem(:,3),:);
13 xi = [z2(:,1)-z3(:,1), z3(:,1)-z1(:,1), z1(:,1)-z2(:,1)];
14 eta = [z2(:,2)-z3(:,2), z3(:,2)-z1(:,2), z1(:,2)-z2(:,2)];
15 area = 0.5*(xi(:,1).*eta(:,2)-xi(:,2).*eta(:,1));

```

接着给出稀疏装配指标

```
1 %% ----- Sparse assembling index -----
2 % elementwise d.o.f.s
3 [elem2dof ,Ndof ,NNdof] = dof2d(Th,feSpace);
4
5 % assembling index
6 nnz = NT*Ndof^2;
7 ii = zeros(nnz,1); jj = zeros(nnz,1); id = 0;
8 for i = 1:Ndof
9     for j = 1:Ndof
10         ii(id+1:id+NT) = elem2dof(:,i); % zi
11         jj(id+1:id+NT) = elem2dof(:,j); % zj
12         id = id + NT;
13     end
14 end
```

这里为了程序的简洁, 局部整体对应 elem2dof 由单独的函数 dof2d.m 给定. 双线性形式的装配过程如下

```
1 %% ----- Bilinear form -----
2 if ~isempty(Trial)
3     K = zeros(NT,Ndof^2);
4     for ss = 1:length(Test) % ss-th component of bilinear form
5         % Test and Trial functions (val, dx, dy, grad)
6         v = Test{ss}; u = Trial{ss};
7         vbase = Base2D(v,node,elem,feSpace,quadOrder); % v1,v2,v3
8         ubase = Base2D(u,node,elem,feSpace,quadOrder); % u1,u2,u3
9         % Coef matrix
10        cf = Coef{ss};
11        if isnumeric(cf) && length(cf)==1, cf = @(pz) cf+0*pz(:,1); end
12        cc = zeros(NT,nG);
13        for p = 1:nG
14            pz = lambda(p,1)*z1 + lambda(p,2)*z2 + lambda(p,3)*z3;
15            cc(:,p) = cf(pz);
16        end
17        if contains(v,'.grad') % of course u = u.grad
18            cgrad = ones(NT,2*nG);
19            cgrad(:,1:2:end) = cc; cgrad(:,2:2:end) = cc; cc = cgrad;
```

```

20         end
21         % Weight matrix
22         ww = repmat(weight,NT,1);
23         if contains(v, '.grad') % of course u = u.grad
24             ww = zeros(1,2*nG);
25             ww(1:2:end) = weight; ww(2:2:end) = weight;
26             ww = repmat(ww,NT,1);
27         end
28         % Stiffness matrix
29         s = 1;
30         for i = 1:Ndof
31             for j = 1:Ndof
32                 vi = vbase{i}; uj = ubase{j};
33                 K(:,s) = K(:,s) + area.*sum(ww.*cc.*vi.*uj,2);
34                 s = s+1;
35             end
36         end
37     end
38     output = sparse(ii,jj,K(:,NNdof,NNdof)); % kk
39     return; % The remaining code will be neglected.
40 end

```

在上面的程序中, 我们添加了 `if` 条件, 以判断是否有试探函数. 如果 `Trial = []`, 那么默认考虑的是如下的线性形式

$$\ell(v) = \int_{\mathcal{T}_h} f v \mathrm{d}x.$$

对应用法如下:

```

1 Coef = pde.f; Test = 'v.val';
2 ff = int2d(Th,Coef,[],Test);

```

程序中 `return` 的作用是: 当考虑的是双线性形式的时候, 不再执行后面的语句. 而后面的语句就是计算线性形式的, 补充的程序如下

```

1 %% ----- Linear form -----
2 % % isempty(Trial)
3 % Test functions (v.val)
4 v = Test;
5 vbase = Base2D(v,node,elem,feSpace,quadOrder); % v1,v2,v3
6 % Coef matrix
7 f = Coef;

```

```

8 if isnumeric(f) && length(f)==1, f = @pz f+0*pz(:,1); end % a ...
    constant
9 cc = zeros(NT,nG);
10 for p = 1:nG
11     pz = lambda(p,1)*z1 + lambda(p,2)*z2 + lambda(p,3)*z3;
12     cc(:,p) = f(pz);
13 end
14 % Weight matrix
15 ww = repmat(weight,NT,1);
16 % Load vector
17 F = zeros(NT,Ndof); % straighten
18 for j = 1:Ndof
19     vj = vbase{j};
20     F(:,j) = area.*sum(ww.*cc.*vj,2); % [f*phi1, f*phi2, f*phi3]
21 end
22 output = accumarray(elem2dof(:, F(:, [NNdof 1])), % ff

```

在后续的讨论中, 我们将逐步添加其他有限元, 如高阶 Lagrange 元, 向量型有限元等.

7.3 int1d 函数

7.3.1 变分形式的计算

考虑仅含一阶导的双线性形式. 对一维问题, 双线性形式一般是如下典型项的组合

$$\int_{\mathcal{T}_h} au'v' dx, \quad \int_{\mathcal{T}_h} a u v dx, \quad \int_{\mathcal{T}_h} a u' v dx, \quad \int_{\mathcal{T}_h} a u v' dx,$$

这里 \mathcal{T}_h 是由若干线段组成的一维单元, 可以是一维、二维和三维空间中的. 以最后一项为例, 习惯把检验函数 v 的项放在前面, 即令

$$a(v, u) = \int_{\mathcal{T}_h} a u v' dx = \int_{\mathcal{T}_h} a v' u dx,$$

这是因为单元刚度矩阵为 (线性元)

$$[K^e] = \int_K a \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix}' [\phi_1, \phi_2] dx = \int_K a \begin{bmatrix} \phi'_1 \phi_1 & \phi'_1 \phi_2 \\ \phi'_2 \phi_1 & \phi'_2 \phi_2 \end{bmatrix} dx,$$

顺序上一致.

设

$$v_1 = \phi'_1, \quad v_2 = \phi'_2, \quad u_1 = \phi_1, \quad u_2 = \phi_2,$$

则

$$[K^e] = \int_K a \begin{bmatrix} v_1 u_1 & v_1 u_2 \\ v_2 u_1 & v_2 u_2 \end{bmatrix} dx =: \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix},$$

式中,

$$k_{ij} = \int_K a v_i u_j dx, \quad K = [x_l, x_r],$$

且积分可采用 Simpson 公式计算. 为了一般性我们采用 Gauss 积分公式.

为了方便, 以下用 x 表示线段的弧长参数, 那么单元 $K = [x_j, x_{j+1}]$ 的两个节点基为

$$\phi_1(x) = \lambda_1(x) = \frac{x_{j+1} - x}{h_j}, \quad \phi_2(x) = \lambda_2(x) \frac{x - x_j}{h_j},$$

这里的 (λ_1, λ_2) 就是线坐标. 导函数为

$$\lambda'_1(x) = -\frac{1}{h_j}, \quad \lambda'_2(x) = \frac{1}{h_j}.$$

积分转化到线坐标下后, 如下计算

$$k_{ij} = \int_K a v_i u_j dx = |K| \int_{\hat{K}} \tilde{a} \tilde{v}_i \tilde{u}_j dt \approx |K| \sum_{p=1}^{n_g} w_p a(x_p) v_i(x_p) u_j(x_p), \quad (7.3)$$

这里的 Guass 点和权重由 Chen L 的 iFEM 包给出, 见那里的函数 quadpts1.m. 用法如下

```
1 [lambda, weight] = quadpts1(order);
```

注意返回的是线坐标, 即参考单元上的结果. `lambda` 有两列, 分别对应 λ_1, λ_2 的 Guass 点, `weight` 是行向量. 区间 $[a, b]$ 的第 p 个 Guass 点如下计算

```
1 pz = lambda(p,1)*za + lambda(p,2)*zb;
```

这里的 `za` 和 `zb` 可以是 d 维空间中线段的两个端点坐标 ($d = 1, 2, 3$).

注意, 因是 d 维情形, 单元长度如下计算

```
1 % length
2 za = node(elem1D(:,1),:); zb = node(elem1D(:,2),:);
3 h = sqrt(sum((zb-za).^2,2));
```

这里的 `node` 是 d 维情形的网格剖分节点坐标集. 所有单元的检验函数值如下

```
1 % Gauss quadrature rule
2 quadOrder = 3;
3 [lambda, weight] = quadpts1(quadOrder); ng = length(weight);
4 Dlambda1 = -1./h; v1 = repmat(Dlambda1, 1, ng);
5 Dlambda2 = 1./h; v2 = repmat(Dlambda2, 1, ng);
```

注意一阶导是常数, 这里复制 n_g 列即得所有积分点处的值. 这样, v_i 是一个矩阵, 行对应单元, 列对应积分点.

试探函数 $u_i = \phi_i$ 如下计算

```
1 u1 = repmat(lambda(:,1)', nel, 1);
2 u2 = repmat(lambda(:,2)', nel, 1);
```

注意, λ 的第 i 列对应 λ_i 的所有积分点, 转置复制 nel 行就是所有单元的. 此时, u_j 是矩阵, 行对应单元, 列对应积分点.

先不考虑积分系数, 按照装配的规定, k_{ij} 如下排列

$$K = [k_{11}, k_{12}, k_{21}, k_{22}],$$

其中每个 k_{ij} 是列向量, 对应所有单元的结果. 记 v_i 与 u_j 点乘后所得矩阵为 k_{ij} , 它的每行对应一个单元, 而每列恰好对应积分公式 (7.3) 右端的一个求和项, 只不过未乘以权重. 对应矩阵 k_{ij} , 我们可获得权重矩阵

```
1 ww = repmat(weight, nel, 1);
```

注意权重 $weight$ 是一行向量, 列对应积分点. 复制 nel 行就是所有单元的结果. 这样, 将 ww 和 k_{ij} 点乘, 然后按行求和就是 (7.3) 右端的求和结果.

```
1 k11 = sum(ww.*v1.*u1, 2);
2 k12 = sum(ww.*v1.*u2, 2);
3 k21 = sum(ww.*v2.*u1, 2);
4 k22 = sum(ww.*v2.*u2, 2);
5 K = [k11, k12, k21, k22];
```

最后, 每行还要乘以单元长度

```
1 ndof = 2;
2 K = repmat(h, 1, ndof^2).*K;
```

当然为了方便, 上面的过程可用一个简单的循环实现.

```
1 K = zeros(nel, ndof^2); s = 1;
2 v = {v1, v2}; u = {u1, u2};
3 for i = 1:ndof
4     for j = 1:ndof
5         vi = v{i}; uj = u{j};
6         K(:, s) = h.*sum(ww.*vi.*uj, 2);
7         s = s+1;
```

```
8     end  
9 end
```

接着, 我们加上积分前的系数, 注意一般是 d 维的, 如二维问题 Robin 边界条件会产生一维的双线性函数. 根据上面的说明, 我们只要获得类似 v_i 或 u_j 这样的系数矩阵即可, 它的每行对应一个单元, 每列对应一个积分点. 对第 p 个和项, 所有单元的积分点坐标 p_z 如下

```
1 pz = lambda(p,1)*za + lambda(p,2)*zb;
```

系数矩阵如下 (例如取 $a = a(x, y) = x + y$)

```
1 cf = @(pz) pz(:,1)+pz(:,2);  
2 cc = zeros(nel,ng);  
3 for p = 1:ng  
4     pz = lambda(p,1)*za + lambda(p,2)*zb;  
5     cc(:,p) = cf(pz);  
6 end
```

这里为了方便处理维数, 函数的参数采用向量型.

这样, 前面的循环可修改为

```
1 K = zeros(nel,ndof^2); s = 1;  
2 v = {v1,v2}; u = {u1,u2};  
3 for i = 1:ndof  
4     for j = 1:ndof  
5         vi = v{i}; uj = u{j};  
6         K(:,s) = h.*sum(ww.*cc.*vi.*uj,2);  
7         s = s+1;  
8     end  
9 end
```

注 7.2 一般地, 对 $d \geq 2$ 维, 所有系数函数等均采用向量型变量.

7.3.2 变分形式的程序设计

程序中只需要修改 v_1, v_2, u_1, u_2 即可. 考虑变分形式 (3.3), 我们给出如下对应

```
1 Coef = {-acoef, bcoef, ccoef};  
2 Trial = {'u.dx', 'u.dx', 'u.val'};  
3 Test = {'v.dx', 'v.val', 'v.val'};
```

这里, u 对应试探函数 (即数值解对应的函数), v 对应检验函数; $u.\text{val}$ 表示函数本身, $u.\text{dx}$ 表示一阶导. 注意同一位置的三个数据对应双线性形式的一个组份. 双线性形式的函数格式如下

```
1 kk = int1D(Th, Coef, Trial, Test);
```

这里 Th 存储 node 和 elem1D .

基函数及导函数程序如下

```
1 function w = Base1D(wStr, node, elem1D, feSpace, quadOrder)
2
3 if nargin == 3, feSpace = []; quadOrder = 3; end % default: P1
4 if nargin == 4, quadOrder = 3; end
5
6 wStr = lower(wStr); % lowercase string
7 nel = size(elem1D, 1);
8
9 % length
10 za = node(elem1D(:, 1), :); zb = node(elem1D(:, 2), :);
11 h = sqrt(sum((zb - za).^2, 2));
12
13 % Gauss quadrature rule
14 [lambda, weight] = quadpts1(quadOrder); ng = length(weight);
15
16 % derivatives of bases
17 Dlambda1 = -1./h;
18 Dlambda2 = 1./h;
19
20 %% P1-Lagrange
21 if strcmpi(feSpace, 'P1') || isempty(feSpace)
22     % u.val
23     if contains(wStr, '.val')
24         w1 = repmat(lambda(:, 1)', nel, 1); % phi1 at xp, p = 1, 2, ...
25         w2 = repmat(lambda(:, 2)', nel, 1);
26     end
27     % u.dx
28     if contains(wStr, '.dx')
29         w1 = Dlambda1; w1 = repmat(w1, 1, ng);
30         w2 = Dlambda2; w2 = repmat(w2, 1, ng);
31     end
32 end
```

```

32     w = {w1,w2};
33 end

```

这里, 基函数和导函数都是矩阵, 行对应单元, 列对应积分点. 函数文件如下

```

1 function output = int1d(Th,Coef,Trial,Test,feSpace,quadOrder)
2
3 if nargin == 4, feSpace = []; quadOrder = 3; end % default: P1
4 if nargin == 5, quadOrder = 3; end
5
6 % mesh information
7 node = Th.node;
8 elem1D = Th.elem1D; nel = size(elem1D,1);
9
10 % Guass-Quadrature
11 [lambda,weight] = quadpts1(quadOrder); ng = length(weight);
12 % length
13 za = node(elem1D(:,1),:); zb = node(elem1D(:,2),:);
14 h = sqrt(sum((zb-za).^2,2));
15
16 %% ----- Sparse assembling index -----
17 % elementwise d.o.f.s
18 [elem2dof,ndof,NNdof] = dof1d(Th,feSpace);
19
20 % assembling index
21 nnz = nel*ndof^2;
22 ii = zeros(nnz,1); jj = zeros(nnz,1); id = 0;
23 for i = 1:ndof
24     for j = 1:ndof
25         ii(id+1:id+nel) = elem2dof(:,i); % zi
26         jj(id+1:id+nel) = elem2dof(:,j); % zj
27         id = id + nel;
28     end
29 end
30
31 %% ----- Bilinear form -----
32 if ~isempty(Trial)
33     K = zeros(nel,ndof^2);
34     for ss = 1:length(Test) % ss-th component of bilinear form
35         % Test and Trial functions (val, dx)

```

```

36     v = Test{ss}; u = Trial{ss};
37     vbase = Base1D(v,node,elem1D,feSpace,quadOrder); % v1,v2
38     ubase = Base1D(u,node,elem1D,feSpace,quadOrder); % u1,u2
39     % Coef matrix
40     cf = Coef{ss};
41     if isnumeric(cf) && length(cf)==1, cf = @pz cf+0*pz(:,1); ...
42         end % a constant, x = pz(:,1)
43     cc = zeros(nel,ng);
44     for p = 1:ng
45         pz = lambda(p,1)*za + lambda(p,2)*zb;
46         cc(:,p) = cf(pz);
47     end
48     % Weight matrix
49     ww = repmat(weight,nel,1);
50     % Stiffness matrix
51     s = 1;
52     for i = 1:ndof
53         for j = 1:ndof
54             vi = vbase{i}; uj = ubase{j};
55             K(:,s) = K(:,s) + h.*sum(ww.*cc.*vi.*uj,2);
56             s = s+1;
57         end
58     end
59     output = sparse(ii,jj,K(:,NNdof,NNdof)); % kk
60     return; % The remaining code will be neglected.
61 end

```

对二维问题的 P2-Lagrange 有限元, 边界上中点自由度的排序要按 Ω_h 的整体来考虑. 为此, Th 添加域 Th.elem1D. 在上面的程序中, 我们添加了 `if` 条件, 以判断是否有试探函数. 如果 `Trial = []`, 那么默认考虑的是如下的线性形式

$$\ell(v) = \int_{\mathcal{T}_h} f v dx.$$

对应用法如下:

```

1 Coef = pde.f; Test = 'v.val';
2 ff = int1d(Th,Coef,[],Test);

```

程序中 `return` 的作用是: 当考虑的是双线性形式的时候, 不再执行后面的语句. 而后面的语句就是计算线性形式的, 补充的程序如下

```

1 %% ----- Linear form -----
2 % % if isempty(Trial)
3 % Test functions (v.val)
4 v = Test;
5 vbase = Base1D(v,node,elem1D,feSpace,quadOrder); % v1,v2
6 % Coef matrix
7 if isnumeric(Coef)&&size(Coef,2)==ng, cc = Coef; end % matrix of ...
    size NT*ng
8 if length(Coef)==1 % function handle or a constant
9     cf = Coef;
10    if isnumeric(cf), cf = @(p) cf + 0*p(:,1); end
11    cc = zeros(nel,ng);
12    for p = 1:ng
13        pz = lambda(p,1)*za + lambda(p,2)*zb;
14        cc(:,p) = cf(pz);
15    end
16 end
17 % Weight matrix
18 ww = repmat(weight,nel,1);
19 % Load vector
20 F = zeros(nel,ndof); % straighten
21 for j = 1:ndof
22     vj = vbase{j};
23     F(:,j) = h.*sum(ww.*cc.*vj,2); % [f*phi1, f*phi2]
24 end
25 output = accumarray(elem2dof(:), F(:),[NNdof 1]); % ff

```

注意, 线性形式只给出了一个组份, 因为它的检验函数一般都是 .val 情形, 而多个 f 可合并.

另外, 边界积分可能涉及到边界法向量, 它不能或不太容易用一个统一的匿名函数表达. 为此, 我们容许系数是按规定给出的矩阵, 即行对应单元、列对应积分点的矩阵(若有必要的话, 其他类似的系数矩阵都可如此). 这一点在后面的例子中再说明.

7.4 一维问题 Lagrange 有限元程序示例

7.4.1 一维问题的一阶 Lagrange 有限元

考虑两点边值问题

$$-au'' + bu' + cu = f(x), \quad 0 < x < L,$$

取精确解为

$$u(x) = \frac{1}{2e}e^{2x} - \frac{1}{2}(1+e^{-1})e^x + \frac{1}{2}.$$

边界条件可以是 Dirichlet 边界条件或 Neumann 边界条件, 但为了保证解的唯一性, 总假设含有 Dirichlet 边界条件. 变分形式为

$$a(u, v) = \ell(v),$$

其中

$$\begin{aligned} a(u, v) &= \int_0^L (au'v' + bu'v + cuv)dx, \\ \ell(v) &= \int_0^L f(x)v(x)dx + au'v|_0^L. \end{aligned}$$

首先, 我们给定网格和边界条件信息如下

```
1 % ----- Mesh and boundary conditions -----
2 a = 0; b = 1;
3 nel = 10; N = nel+1; % numbers of elements and nodes
4 node = linspace(a,b,nel+1)';
5 elem1D = zeros(nel,2); elem1D(:,1) = 1:N-1; elem1D(:,2) = 2:N;
6 Th.node = node; Th.elem1D = elem1D;
```

为了方便, 类似二维问题, 我们额外定义了 setboundary1D.m 以规定边界条件, 实际上就是确定区间的左右端点的边界类型. 函数用法如下

```
1 bdNeumann = 'abs(x-1)<=1e-4';
2 bdStruct = setboundary1D(node, elem1D, bdNeumann);
```

bdStruct 是一个结构体, 包含 Dirichlet 和 Neumann 两个域, 它们分别给定相应的节点序号. PDE 的信息由函数文件 pdedata1D.m 给定, 如下调用.

```
1 pde = pdedata1D;
```

结构体 pde 包含的信息如下

```

1 pde = struct('uexact',@uexact, 'f', @f, 'g_D', @g_D, 'Du', @Du, ...
    'a', @a, 'b', @b, 'c', @c);

```

注意, 系数函数和其他函数都以匿名函数的形式给出.

双线性形式 $a(u, v)$ 对应的刚度矩阵如下实现

```

1 % ----- Stiffness matrix -----
2 Coef = {pde.a, pde.b, pde.c};
3 Trial = {'u.dx', 'u.dx', 'u.val'};
4 Test = {'v.dx', 'v.val', 'v.val'};
5 kk = int1d(Th,Coef,Trial,Test,feSpace,quadOrder);

```

线性形式的第一项如下

```

1 % ----- Load vector -----
2 Coef = pde.f; Test = 'v.val';
3 ff = int1d(Th,Coef,[],Test,feSpace,quadOrder);

```

仅考虑 Neumann 边界条件和 Dirichlet 边界条件. Neumann 边界条件, 即

$$au'v|_0^L = ag_Nv|_0^L = (ag_Nv)_L \cdot 1 + (ag_Nv)_0 \cdot (-1),$$

注意左侧端点的外法向量为 -1 , 右侧则为 $+1$. 它可看成退化的双线性形式, 这里系数函数为 a . 给定 Neumann 边界点的序号 Neumann , 若它是向量 $\text{elem1D}(:, 1)$ 中的元素, 则对应左端点, 从而法向量为 -1 , 反之为 $+1$. 这样, Neumann 边界条件如下处理

```

1 % ----- Neumann boundary conditions -----
2 if isempty(Neumann)
3     nvec = 1;
4     if find(Th.elem1D(:,1)==Neumann), nvec = -1; end
5     Dnu = pde.Du(node(Neumann,:))*nvec;
6     ff(Neumann) = ff(Neumann) + Coef(node(Neumann,:))*Dnu;
7 end

```

而 Dirichlet 边界条件如下处理

```

1 % ----- Dirichlet boundary conditions -----
2 isBdNode = false(NNdof,1); isBdNode(Dirichlet) = true;
3 bdDof = (isBdNode); freeDof = (~isBdNode);
4 u = zeros(NNdof,1); u(bdDof) = pde.g_D(node(Dirichlet,:));
5 ff = ff - kk*u;

```

处理边界条件的完整程序见 Applyboundary1D.m (显然高阶元的处理是一致的, 不同的是 NNdof 的数值).

以上说明总结为如下函数文件.

```
1 function uh = FEM1D_variational(Th,pde,feSpace,quadOrder)
2
3 % Quadrature orders for int1d and int2d
4 if nargin==2, feSpace = 'P1'; quadOrder = 3; end % default: P1
5 if nargin==3, quadOrder = 3; end
6
7 % ----- Stiffness matrix -----
8 Coef = {pde.a, pde.b, pde.c};
9 Trial = {'u.dx', 'u.dx', 'u.val'};
10 Test = {'v.dx', 'v.val', 'v.val'};
11 kk = int1d(Th,Coef,Trial,Test,feSpace,quadOrder);
12
13 % ----- Load vector -----
14 Coef = pde.f; Test = 'v.val';
15 ff = int1d(Th,Coef,[],Test,feSpace,quadOrder);
16
17 % ----- Boundary value conditions -----
18 uh = Applyboundary1D(Th,kk,ff,pde);
```

对误差分析, 我们编写了 getL2error1D.m 和 getH1error1D.m 两个函数, 用以计算 L^2 和 H^1 误差. 主程序如下

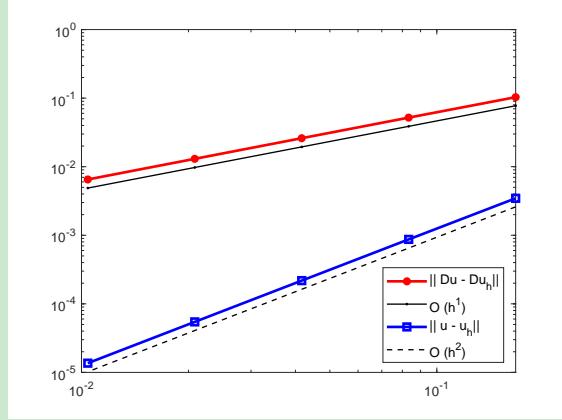
```
1 clc;clear; close all;
2 % ----- Mesh and boundary conditions -----
3 a = 0; b = 1;
4 nel = 3; N = nel+1; % numbers of elements and nodes
5 node = linspace(a,b,nel+1)';
6 elem1D = zeros(nel,2); elem1D(:,1) = 1:N-1; elem1D(:,2) = 2:N;
7
8 bdNeumann = 'abs(x-0)<=1e-4';
9
10 % ----- PDE -----
11 pde = pdedata1D;
12
13 % ----- Poisson -----
14 maxIt = 5;
```

```

15 N = zeros(maxIt,1);      h = zeros(maxIt,1);
16 ErrL2 = zeros(maxIt,1);  ErrH1 = zeros(maxIt,1);
17
18 feSpace = 'P1'; quadOrder = 4;
19 for k = 1:maxIt
20     [node,elem1D] = uniformrefine1D(node,elem1D);
21     bdStruct = setboundary1D(node,elem1D,bdNeumann);
22     Th.node = node; Th.elem1D = elem1D; Th.bdStruct = bdStruct;
23     uh = FEM1D_variational(Th,pde,feSpace,quadOrder);
24     nel = size(elem1D,1);
25     h(k) = 1/nel;
26     ErrL2(k) = ...
27         getL2error1D(node,elem1D,uh,pde.uexact,feSpace,quadOrder);
28     ErrH1(k) = getH1error1D(node,elem1D,uh,pde.Du,feSpace,quadOrder);
29
30 % ----- Show rate -----
31 figure, showrateh(h,ErrL2,ErrH1);

```

误差阶图像如下



可以看到, H^1 和 L^2 的误差阶分别为 1 阶和 2 阶, 这与理论结果相符.

7.4.2 一维问题的高阶 Lagrange 元

现在我们考虑 P2 和 P3 有限元, 程序的修改步骤如下.

Step 1: 在 Lagrange_base_1D.m 中添加高阶元的基函数.

P2-Lagrange 元的局部自由度排列为: 左端点值、右端点值和中点值. 对应的基函数及其导数如下

1 %% P2-Lagrange

```

2 if strcmpi(feSpace, 'P2')
3 % u.val
4 if contains(wStr, '.val')
5     w1 = lambda(:,1) .* (2*lambda(:,1)'-1);    w1 = repmat(w1,nel,1);
6     w2 = lambda(:,2) .* (2*lambda(:,2)'-1);    w2 = repmat(w2,nel,1);
7     w3 = 4*lambda(:,1).*lambda(:,2)';           w3 = repmat(w3,nel,1);
8 end
9 % u.dx
10 if contains(wStr, '.dx')
11     w1 = zeros(nel,ng);   w2 = w1;  w3 = w1;
12     for p = 1:ng
13         w1(:,p) = (4*lambda(p,1)-1)*Dlambda1;
14         w2(:,p) = (4*lambda(p,2)-1)*Dlambda2;
15         w3(:,p) = 4*(lambda(p,1)*Dlambda2+lambda(p,2)*Dlambda1);
16     end
17 end
18 w = {w1,w2,w3};
19 end

```

P3-Lagrange 元的局部自由度排列为: 左端点值、右端点值、 $1/3$ 点值和 $2/3$ 点值. 对应的基函数及其导数如下

```

1 %% P3-Lagrange
2 if strcmpi(feSpace, 'P3')
3 % u.val
4 if contains(wStr, '.val')
5     w1 = 0.5*(3*lambda(:,1)-1).*(3*lambda(:,1)-2).*lambda(:,1);
6     w2 = 0.5*(3*lambda(:,2)-1).*(3*lambda(:,2)-2).*lambda(:,2);
7     w3 = 9/2*lambda(:,1).*lambda(:,2).*(3*lambda(:,1)-1);
8     w4 = 9/2*lambda(:,2).*lambda(:,1).*(3*lambda(:,2)-1);
9     w1 = repmat(w1',nel,1);      w2 = repmat(w2',nel,1);
10    w3 = repmat(w3',nel,1);      w4 = repmat(w4',nel,1);
11 end
12 % u.dx
13 if contains(wStr, '.dx')
14     w1 = zeros(nel,ng);   w2 = w1;  w3 = w1;
15     for p = 1:ng
16         w1(:,p) = (27/2*lambda(p,1)^2-9*lambda(p,1)+1).*Dlambda1;
17         w2(:,p) = (27/2*lambda(p,2)^2-9*lambda(p,2)+1).*Dlambda2;
18         w3(:,p) = 9/2*(lambda(p,1)*(3*lambda(p,1)-1).*Dlambda2 ...

```

```

19         + lambda(p,2)*(6*lambda(p,1)-1).*Dlambda1);
20 w4(:,p) = 9/2*(lambda(p,2)*(3*lambda(p,2)-1).*Dlambda1 ...
21         + lambda(p,1)*(6*lambda(p,2)-1).*Dlambda2);
22     end
23 end
24 w = {w1,w2,w3,w4};
25 end

```

Step 2: 在 int1d.m 中添加高阶元的局部整体对应矩阵 elem2dof.

elem2dof 由单独的函数文件 dof1d.m 给出, 其用法如下

```

1 % elementwise d.o.f.s
2 [elem2dof,ndof,NNdof] = dof1d(Th,feSpace);

```

注意, 该函数本身也用于二维问题边界积分的处理, 而边界积分的计算要匹配二维自由度个数, 所以它与直接的一维问题还是有区别的. 我们通过判断 Th 中是否有 elem 来判断是否是二维问题. P2-Lagrange 对应的程序为

```

1 ndof = 3; NNdof = N + nel;
2 elem2dof = [elem1D, (1:nel)' + N];

```

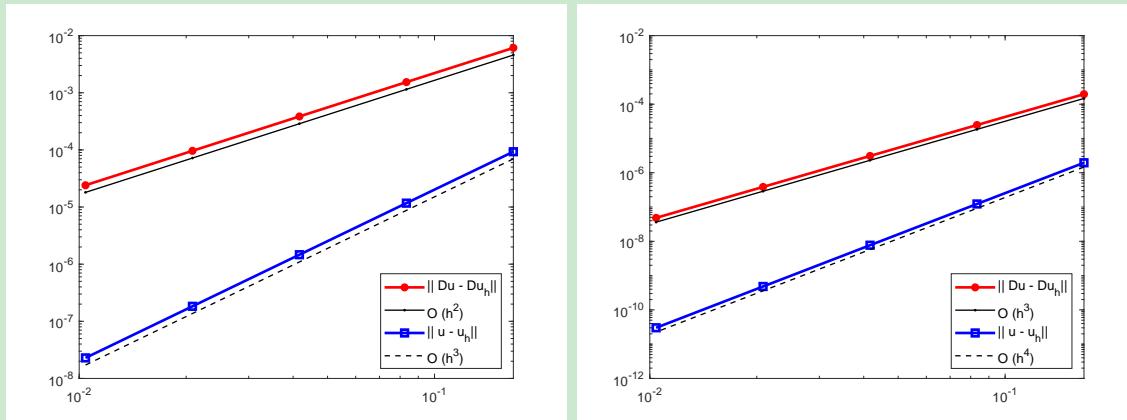
P3-Lagrange 对应的程序为

```

1 ndof = 4; NNdof = N + 2*nel;
2 elem2dof = [elem1D, (1:nel)' + N, (1:nel)' + N + nel];

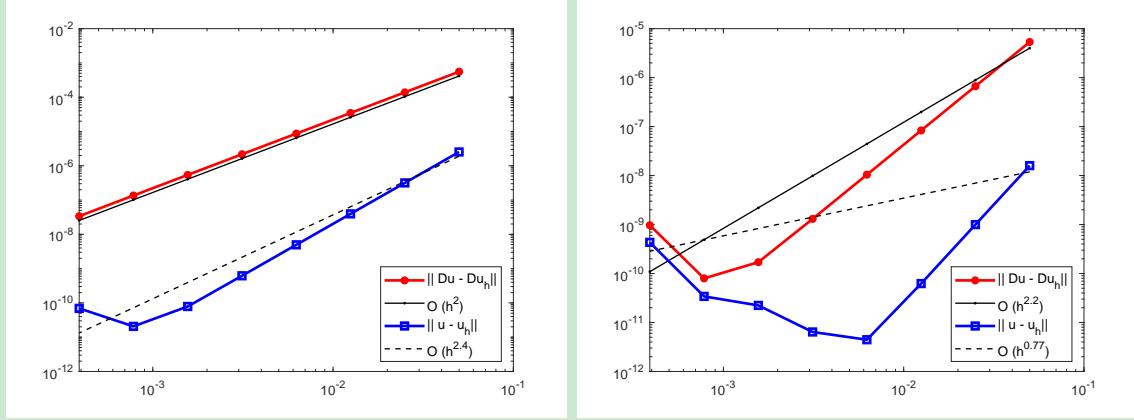
```

经过上面两步, 高阶元的程序就已经完成了. 为此计算误差阶, 我们还对应修改 getL2error1D.m 和 getH1error1D.m, 这里不再给出其程序. P2-Lagrange 元和 P3-Lagrange 元的误差阶图像如下



可以看到, 误差阶与理论结果相符. 需要指出的是, P1,P2,P3 元的 Gauss 积分阶 quadOrder 分别取为 4,5,6. 前两个元的取为 3,4 即可. 若 P3 元的取为 5, 则所得误差阶都为 4, 即观察

到 H^1 误差有超收敛现象. 另外, 初始网格单元个数不宜多, 特别对 3 阶元. 因为此时误差已经很小, 网格加密后误差不一定继续减小, 这是数值方法的共性, 即所谓的半收敛现象, 如下图所示 (初始单元个数为 10)



注: 若从转折处截取线段, 则可发现误差阶与理论结果相符 (注意右侧线段对应的 h 更大).

7.5 二维问题 Lagrange 有限元程序示例

7.5.1 二维问题的一阶 Lagrange 有限元

程序编写说明

考虑如下的一般问题

$$\begin{cases} -\nabla \cdot (a \nabla u) + cu = f & \text{in } \Omega, \\ u = g_D & \text{on } \Gamma_D, \\ g_R u + a \partial_n u = g_N & \text{on } \Gamma_R, \end{cases}$$

设区域 $\Omega = (0, 1)^2$, 且右侧对应 Γ_R , 其他都为 Γ_D . 对齐次 Dirichlet 边界条件, 变分问题为: 找 $u \in V := H_0^1(\Omega)$ 使得

$$a(u, v) = \ell(v), \quad v \in V,$$

式中,

$$\begin{aligned} a(u, v) &= \int_{\Omega} a \nabla u \cdot \nabla v d\sigma + \int_{\Omega} c u v d\sigma + \int_{\Gamma_R} g_R u v ds, \\ \ell(v) &= \int_{\Omega} f v d\sigma + \int_{\Gamma_R} g_N v ds. \end{aligned}$$

初始网格和边界条件如下给出.

```
1 % ----- Mesh and boundary conditions -----
```

```

2 a1 = 0; b1 = 1; a2 = 0; b2 = 1;
3 N = 2^1;
4 Nx = N; Ny = N; h1 = (b1-a1)/Nx; h2 = (b2-a2)/Ny;
5 [node, elem] = squaremesh([a1 b1 a2 b2], h1, h2);
6
7 bdNeumann = 'abs(x-1)<1e-4'; % string for Neumann

```

相关 PDE 数据见 Poisondat2.m, 如下使用.

```

1 % ----- PDE data -----
2 pde = Poisondat2();
3 g_R = @(p) 1 + p(:,1) + p(:,2); % 1 + x + y
4 pde.g_R = g_R;

```

现在我们来定义函数文件 Poisson_variational.m:

```

1 function u = Poisson_variational(Th, pde, feSpace, quadOrder)
2
3 % Quadrature orders for int1d and int2d
4 if nargin==2, feSpace = 'P1'; quadOrder = 3; end % default: P1
5 if nargin==3, quadOrder = 3; end

```

根据网格 Th 的说明, 我们要添加一维边界积分的网格信息以及辅助数据结构信息.

```

1 % ----- Mesh Th -----
2 % elem1D associated with Gamma_R
3 bdStruct = Th.bdStruct;
4 Th.elem1D = bdStruct.elemN; Th.bdIndex1D = bdStruct.bdIndexN;
5 % auxstructure
6 auxT = auxstructure(Th.node, Th.elem);
7 Th.auxT = auxT;

```

Ω 上的双线性形式

$$\int_{\Omega} a \nabla u \cdot \nabla v d\sigma + \int_{\Omega} c u v d\sigma$$

如下计算.

```

1 % ----- Stiffness matrix -----
2 % Omega
3 Coef = {pde.a, pde.c};
4 Trial = {'u.grad', 'u.val'};
5 Test = {'v.grad', 'v.val'};
6 kk = int2d(Th, Coef, Trial, Test, feSpace, quadOrder);

```

Γ_R 上的 elem 要换成相应的一维单元集合, 即 bdStruct.elemN. 而 node 不必更改, 这样也能保证总体刚度矩阵的维数一致. 双线性形式

$$\int_{\Gamma_R} g_R u v d s$$

如下计算.

```

1 % Gamma_R
2 if ~isempty(Th.elem1D)
3     Coef = {pde.g_R};
4     Trial = {'u.val'};
5     Test = {'v.val'};
6     kk = kk + int1d(Th,Coef,Trial,Test,feSpace,quadOrder);
7 end

```

接着, 我们考虑线性形式. 右端的

$$\int_{\Omega} f v d \sigma$$

如下计算.

```

1 % ----- Load vector -----
2 % Omega
3 Coef = pde.f; Test = 'v.val';
4 ff = int2d(Th,Coef,[],Test,feSpace,quadOrder);

```

边界积分

$$\int_{\Gamma_R} g_N v d s$$

中的区域是 Γ_R , 它由一维的 bdStruct.elemN 给出. 注意到 $g_N = g_R u + a \partial_n u$, 它的表达式必然含边界法向量. 对矩形区域, 边界法向量非常简单. 例如, 考虑右边界, 此时 $n = [1, 0]$, 从而 g_N 可用匿名函数表为

```

1 n = [1,0];
2 g_N = @(p) pde.g_R(p).*pde.uexact(p) + pde.a(p).*(pde.Du(p)*n');

```

我们希望处理一般的多角形区域, 鉴于 $\partial_n u$ 不易用匿名函数表达, int1d.m 的线性部分接受散点值系数, 而这些散点值恰好对应此时的系数矩阵 cc, 它是 nel 行 ng 列的矩阵 (nel 是 elemN 的一维单元个数). int1d.m 线性部分的系数矩阵如下

```

1 % Coef matrix
2 if isnumeric(Coef)&&size(Coef,2)==ng, cc = Coef; end % matrix of ...
    size NT*ng

```

```

3 if length(Coef)==1 % function handle or a constant
4     if isnumeric(Coef), cf = @(p) Coef + 0*p(:,1); end
5     cc = zeros(nel,ng);
6     for p = 1:ng
7         pz = lambda(p,1)*za + lambda(p,2)*zb;
8         cc(:,p) = cf(pz);
9     end
10 end

```

为了方便修改 Robin 或 Dirichlet 边界条件, 我们将定义函数 getMat1d.m, 它计算给定匿名函数 fun 的散点值. 特别地, 程序中单独给出 $\partial_n u$ 对应的矩阵. 该函数如下

```

1 function Cmat = getMat1d(fun,Th1D,bdStruct,quadOrder)
2 if nargin==3, quadOrder = 3; end
3
4 node = Th1D.node; elemN = bdStruct.elemN;
5 nel = size(elemN,1);
6
7 % Guass-Quadrature
8 [lambda,weight] = quadpts1(quadOrder); ng = length(weight);
9
10 za = node(elemN(:,1),:); zb = node(elemN(:,2),:);
11 Cmat = zeros(nel,ng);
12
13 % function handle is pde.Du
14 z0 = za(1,:); v0 = fun(z0);
15 if length(v0)>1
16     Du = fun;
17     % nvec
18     e = za-zb; he = sqrt(sum(e.^2,2));
19     nvec = [-e(:,2)./he, e(:,1)./he];
20     % Coef matrix: gN
21     for p = 1:ng
22         pz = lambda(p,1)*za + lambda(p,2)*zb;
23         Cmat(:,p) = sum(Du(pz).*nvec,2);
24     end
25     return; % The remaining code will be neglected.
26 end
27
28 % function handle is not pde.Du

```

```

29 for p = 1:ng
30     pz = lambda(p,1)*za + lambda(p,2)*zb;
31     Cmat(:,p) = fun(pz);
32 end

```

这里, 通过 `length(v0)` 判断 `fun` 是否是 `pde.Du`. 这样, 系数矩阵可如下获得,

```

1 % Gamma_R
2 if ~isempty(Th.elem1D)
3     %Coef = @(p) g_R(p).*pde.uexact(p) + pde.a(p).*(pde.Du(p)*n');
4     Cmat_gR = getMat1d(pde.g_R, Th, quadOrder);
5     Cmat_u = getMat1d(pde.uexact, Th, quadOrder);
6     Cmat_a = getMat1d(pde.a, Th, quadOrder);
7     Cmat_Dnu = getMat1d(pde.Du, Th, quadOrder);
8     Coef = Cmat_gR.*Cmat_u + Cmat_a.*Cmat_Dnu;
9     ff = ff + int1d(Th, Coef, [], Test, feSpace, quadOrder);
10 end

```

边界条件只剩下 Dirichlet 边界条件, 由函数 `Applyboundary2D.m` 进行处理, 这里不再给出具体程序.

```

1 % ----- Boundary value conditions -----
2 u = Applyboundary2D(Th, kk, ff, pde, feSpace);

```

程序整理

前面的讨论整理为如下函数

```

1 function u = Poisson_variational(Th, pde, feSpace, quadOrder)
2
3 % Quadrature orders for int1d and int2d
4 if nargin==2, feSpace = 'P1'; quadOrder = 3; end % default: P1
5 if nargin==3, quadOrder = 3; end
6
7 % ----- Mesh Th -----
8 % elem1D associated with Gamma_R
9 bdStruct = Th.bdStruct;
10 Th.elem1D = bdStruct.elemN; Th.bdIndex1D = bdStruct.bdIndexN;
11 % auxstructure
12 auxT = auxstructure(Th.node, Th.elem);
13 Th.auxT = auxT;

```

```

14
15 % ----- Stiffness matrix -----
16 % Omega
17 Coef = {pde.a, pde.c};
18 Trial = {'u.grad', 'u.val'};
19 Test = {'v.grad', 'v.val'};
20 kk = int2d(Th,Coef,Trial,Test,feSpace,quadOrder);
21 % Gamma_R
22 if ~isempty(Th.elem1D)
23     Coef = {pde.g_R};
24     Trial = {'u.val'};
25     Test = {'v.val'};
26     kk = kk + int1d(Th,Coef,Trial,Test,feSpace,quadOrder);
27 end
28
29 % ----- Load vector -----
30 % Omega
31 Coef = pde.f; Test = 'v.val';
32 ff = int2d(Th,Coef,[],Test,feSpace,quadOrder);
33 % Gamma_R
34 if ~isempty(Th.elem1D)
35     %Coef = @(p) g_R(p).*pde.uexact(p) + pde.a(p).*(pde.Du(p)*n');
36     Cmat_gR = getMat1d(pde.g_R,Th,quadOrder);
37     Cmat_u = getMat1d(pde.uexact,Th,quadOrder);
38     Cmat_a = getMat1d(pde.a,Th,quadOrder);
39     Cmat_Dnu = getMat1d(pde.Du,Th,quadOrder);
40     Coef = Cmat_gR.*Cmat_u + Cmat_a.*Cmat_Dnu;
41     ff = ff + int1d(Th,Coef,[],Test,feSpace,quadOrder);
42 end
43
44 % ----- Boundary value conditions -----
45 u = Applyboundary2D(Th,kk,ff,pde,feSpace);

```

主程序

主程序可如下编写

```

1 clc;clear;close all;
2 % ----- Mesh and boundary conditions -----
3 a1 = 0; b1 = 1; a2 = 0; b2 = 1;

```

```

4 N = 2^1;
5 Nx = N; Ny = N; h1 = (b1-a1)/Nx; h2 = (b2-a2)/Ny;
6 [node,elem] = squaremesh([a1 b1 a2 b2],h1,h2);
7
8 bdNeumann = 'abs(x-1)<1e-4'; % string for Neumann
9
10 % ----- PDE data -----
11 pde = Poisondat2();
12 g_R = @(p) 1 + p(:,1) + p(:,2); % 1 + x + y
13 pde.g_R = g_R;
14
15 % ----- Poisson -----
16 maxIt = 5;
17 N = zeros(maxIt,1); h = zeros(maxIt,1);
18 ErrL2 = zeros(maxIt,1); ErrH1 = zeros(maxIt,1);
19
20 feSpace = 'P1';
21 if strcmp(feSpace,'P1'), quadOrder = 3; end
22 if strcmp(feSpace,'P2'), quadOrder = 4; end
23 if strcmp(feSpace,'P3'), quadOrder = 5; end
24 for k = 1:maxIt
25     [node,elem] = uniformrefine(node,elem);
26     %figure(1), showmesh(node,elem), hold on, pause(0.6)
27     bdStruct = setboundary(node,elem,bdNeumann);
28     Th.node = node; Th.elem = elem; Th.bdStruct = bdStruct;
29     uh = Poisson_variational(Th,pde,feSpace,quadOrder);
30     NT = size(elem,1);
31     h(k) = 1/sqrt(NT);
32     ErrL2(k) = getL2error(node,elem,uh,pde.uexact,feSpace,quadOrder);
33     ErrH1(k) = getH1error(node,elem,uh,pde.Du,feSpace,quadOrder);
34 end
35
36 % ----- Show rate -----
37 figure, showrateh(h,ErrL2,ErrH1);

```

上面的程序计算了 L^2 和 H^1 误差阶.

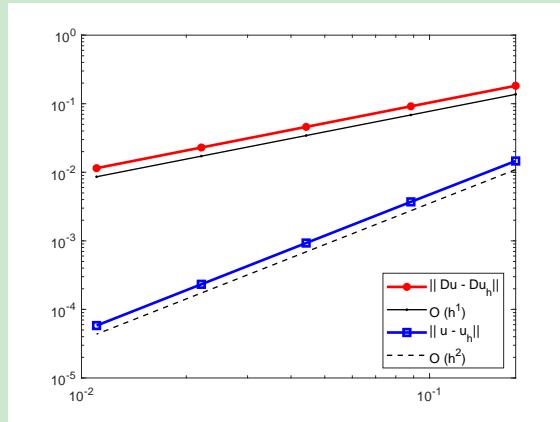
对矩形区域 $\Omega = (0, 1)^2$, 设右边界为 Robin 或 Neumann 边界. 微分方程的信息如下

$$a(x, y) = 1 + x^2 + y^2, \quad c(x, y) = 1, \quad g_R(x, y) = 1 + x + y,$$

精确解取为

$$u(x, y) = \sin(2x + 0.5) \cos(y + 0.3) + \log(3 + xy).$$

误差阶如下图所示.



现在考虑单位圆区域, 可用 MATLAB 的 PDE 工具箱如下生成基本数据结构.

```

1 g = 'circleg';
2 [p,e,t] = initmesh(g, 'hmax', 0.2);
3 node = p'; elem = t(1:3,:)';

```

网格加密可如下进行.

```

1 [p,e,t] = refinemesh(g,p,e,t);

```

取右半圆的边界为 Robin 边界. 微分方程信息不变, 精确解取为 $u = y^2 \sin(\pi x)$, 则主程序可改为

```

1 clc; clear; close all;
2 % ----- Mesh and boundary conditions -----
3 g = 'circleg'; % lshapeg';
4 [p,e,t] = initmesh(g, 'hmax', 0.5);
5 node = p'; elem = t(1:3,:)';
6
7 bdNeumann = 'x>0'; % string for Neumann
8
9 % ----- PDE data -----
10 pde = Poissondata2();
11 g_R = @(p) 1 + p(:,1) + p(:,2); % 1 + x + y
12 pde.g_R = g_R;
13
14 % ----- Poisson -----

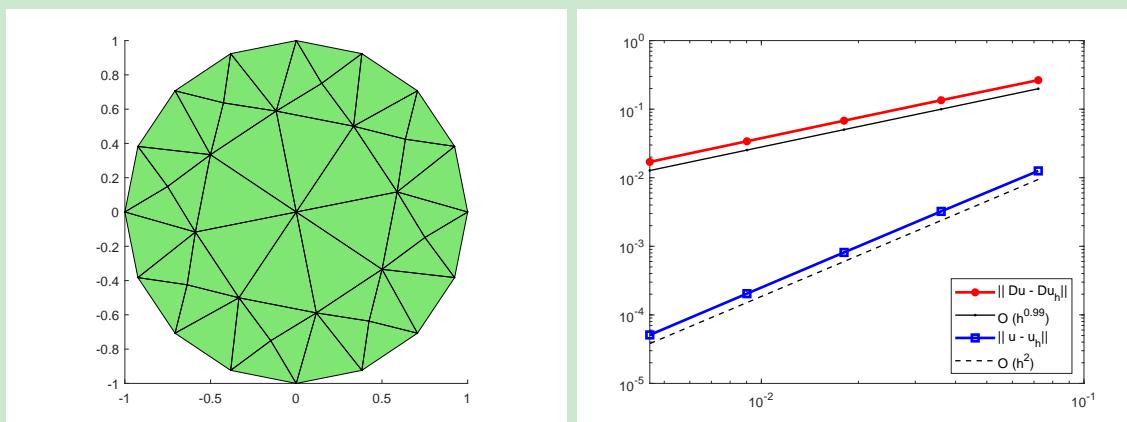
```

```

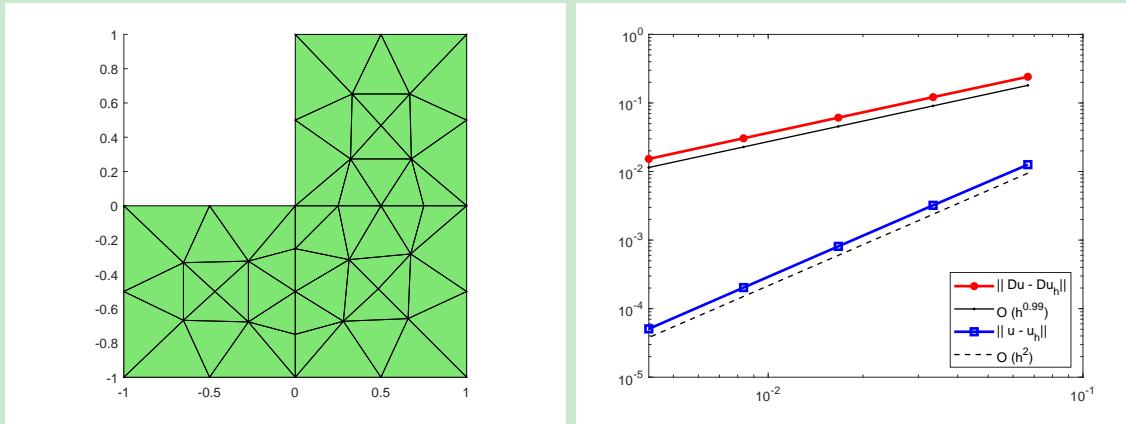
15 maxIt = 5;
16 N = zeros(maxIt,1); h = zeros(maxIt,1);
17 ErrL2 = zeros(maxIt,1); ErrH1 = zeros(maxIt,1);
18
19 feSpace = 'P1';
20 if strcmpi(feSpace,'P1'), quadOrder = 3; end
21 if strcmpi(feSpace,'P2'), quadOrder = 4; end
22 if strcmpi(feSpace,'P3'), quadOrder = 5; end
23 for k = 1:maxIt
24     [p,e,t] = refinemesh(g,p,e,t);
25     node = p'; elem = t(1:3,:)';
26     %figure(1), showmesh(node,elem), hold on, pause(0.6)
27     bdStruct = setboundary(node,elem,bdNeumann);
28     Th.node = node; Th.elem = elem; Th.bdStruct = bdStruct;
29     uh = Poisson_variational(Th,pde,feSpace,quadOrder);
30     NT = size(elem,1);
31     h(k) = 1/sqrt(NT);
32     ErrL2(k) = getL2error(node,elem,uh,pde.uexact,feSpace,quadOrder);
33     ErrH1(k) = getH1error(node,elem,uh,pde.Du,feSpace,quadOrder);
34 end
35
36 % ----- Show rate -----
37 figure, showrateh(h,ErrL2,ErrH1);

```

初始网格和误差阶如下图所示.



PDE 工具箱中还预设了 L 型区域 lshapeg. 在圆形区域的程序中, 把 circleg 替换为 lshapeg, 其他条件不变, 则初始网格和误差阶的图像如下



7.5.2 二维问题的高阶 Lagrange 元

现在我们考虑 P2 和 P3 有限元, 程序的修改步骤如下.

Step 1: 在 Lagrange_base_1D.m 和 Lagrange_base_2D.m 中添加高阶元的基函数.

Lagrange_base_1D.m 在一维问题中已经处理好, 现在考虑二维的基函数. 二维 P2-Lagrange 元的局部自由度有 6 个, 排列为:

$$v(z_1), v(z_2), v(z_3), v(m_1), v(m_2), v(m_3),$$

其中, z_i 为三角形的顶点, m_i 为 z_i 对应的中点 (注意三角形的第一条边规定为 z_1 的对边). 对应的基函数及其导数如下

```

1 %% P2-Lagrange
2 if strcmpi(feSpace, 'P2')
3 % u.val
4 if contains(wStr, '.val')
5 w1 = lambda(:,1)'.*(2*lambda(:,1)'-1);
6 w2 = lambda(:,2)'.*(2*lambda(:,2)'-1);
7 w3 = lambda(:,3)'.*(2*lambda(:,3)'-1);
8 w4 = 4*lambda(:,2)'.*lambda(:,3)';
9 w5 = 4*lambda(:,1)'.*lambda(:,3)';
10 w6 = 4*lambda(:,1)'.*lambda(:,2)';
11 w1 = repmat(w1,NT,1); w2 = repmat(w2,NT,1); w3 = ...
12 repmat(w3,NT,1);
13 w4 = repmat(w4,NT,1); w5 = repmat(w5,NT,1); w6 = ...
14 repmat(w6,NT,1);
15 end
16 % u.dx
17 if contains(wStr, '.dx')
18 w1 = zeros(NT,nG); w2 = w1; w3 = w1; w4 = w1; w5 = w1;
19 w6 = w1;

```

```

17     for p = 1:nG
18         w1(:,p) = Dlambdax(:,1)*(4*lambda(p,1)-1);
19         w2(:,p) = Dlambdax(:,2)*(4*lambda(p,2)-1);
20         w3(:,p) = Dlambdax(:,3)*(4*lambda(p,3)-1);
21         w4(:,p) = 4*(Dlambdax(:,2)*lambda(p,3) + ...
22                         Dlambdax(:,3)*lambda(p,2));
23         w5(:,p) = 4*(Dlambdax(:,1)*lambda(p,3) + ...
24                         Dlambdax(:,3)*lambda(p,1));
25         w6(:,p) = 4*(Dlambdax(:,1)*lambda(p,2) + ...
26                         Dlambdax(:,2)*lambda(p,1));
27     end
28
29 % u.dy
30 if contains(wStr,'.dy')
31     w1 = zeros(NT,nG); w2 = w1; w3 = w1; w4 = w1; w5 = w1; w6 = w1;
32     for p = 1:nG
33         w1(:,p) = Dlambday(:,1)*(4*lambda(p,1)-1);
34         w2(:,p) = Dlambday(:,2)*(4*lambda(p,2)-1);
35         w3(:,p) = Dlambday(:,3)*(4*lambda(p,3)-1);
36         w4(:,p) = 4*(Dlambday(:,2)*lambda(p,3) + ...
37                         Dlambday(:,3)*lambda(p,2));
38         w5(:,p) = 4*(Dlambday(:,1)*lambda(p,3) + ...
39                         Dlambday(:,3)*lambda(p,1));
40         w6(:,p) = 4*(Dlambday(:,1)*lambda(p,2) + ...
41                         Dlambday(:,2)*lambda(p,1));
42     end
43
44 % u.grad
45 if contains(wStr,'.grad')
46     w1 = zeros(NT,2*nG); w2 = w1; w3 = w1; w4 = w1; w5 = w1; ...
47     w6 = w1;
48     for p = 1:nG
49         w1(:,2*p-1:2*p) = Dlambda1*(4*lambda(p,1)-1);
50         w2(:,2*p-1:2*p) = Dlambda2*(4*lambda(p,2)-1);
51         w3(:,2*p-1:2*p) = Dlambda3*(4*lambda(p,3)-1);
52         w4(:,2*p-1:2*p) = 4*(Dlambda2*lambda(p,3) + ...
53                         Dlambda3*lambda(p,2));
54         w5(:,2*p-1:2*p) = 4*(Dlambda1*lambda(p,3) + ...
55                         Dlambda3*lambda(p,1));
56         w6(:,2*p-1:2*p) = 4*(Dlambda1*lambda(p,2) + ...
57                         Dlambda1*lambda(p,1));
58     end
59 end

```

```

        Dlambda2*lambda(p,1));
48      end
49    end
50
51    w = {w1,w2,w3,w4,w5,w6};
52 end

```

P3-Lagrange 元的局部自由度有 10 个, 排列为:

$$\begin{cases} v(z_i), & i = 1, 2, 3; \\ v(a_i), & i = 1, 2, 3; \\ v(b_i), & i = 1, 2, 3; \\ v(z_c). \end{cases}$$

这里, a_i 第 i 条边的 $1/3$ 点, b_i 则是 $2/3$ 点, 而 z_c 是单元的重心. 对应的基函数及其导数不再给出.

Step 2: 在 int1d.m 和 int2d.m 中添加高阶元的局部整体对应矩阵 elem2dof.

int1d.m 在一维问题中已处理好, 现考虑 int2d.m. elem2dof 由单独的函数文件 dof2d.m 给出, 其用法如下

```

1 % elementwise d.o.f.s
2 [elem2dof, Ndof, NNdof] = dof2d(Th, feSpace);

```

P2-Lagrange 对应的程序为

```

1 %% P2-Lagrange
2 if strcmpi(feSpace, 'P2')
3   % auxstructure
4   auxT = Th.auxT;
5   edge = auxT.edge; NE = size(edge,1);
6   elem2edge = auxT.elem2edge;
7   % d.o.f. numbers
8   Ndof = 6; NNdof = N + NE;
9   % local --> global
10  elem2dof = [elem, elem2edge + N];
11 end

```

P3-Lagrange 对应的程序为

```

1 %% P3-Lagrange
2 if strcmpi(feSpace, 'P3')

```

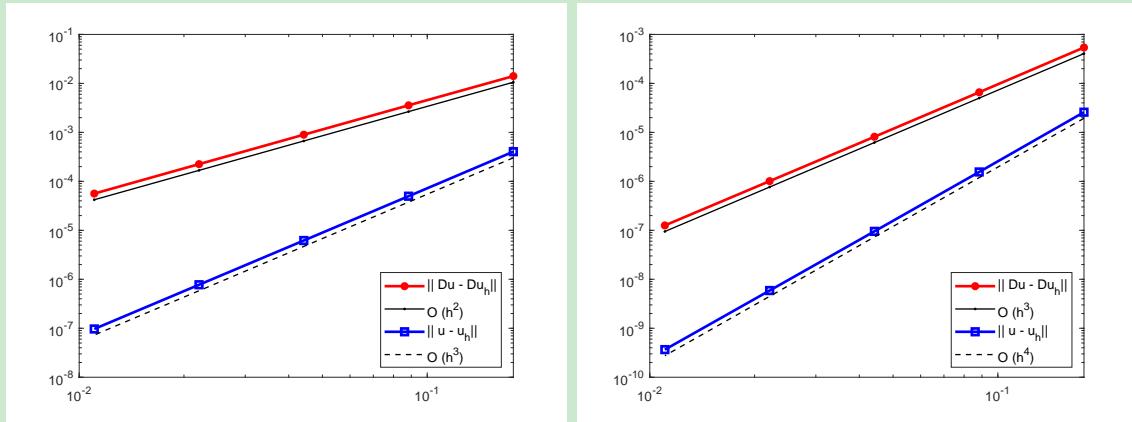
```

3 % auxstructure
4 auxT = Th.auxT;
5 edge = auxT.edge; NE = size(edge,1);
6 elem2edge = auxT.elem2edge;
7 % d.o.f. numbers
8 Ndof = 10; NNdof = N + 2*NE + NT;
9 % sgnelem
10 bdStruct = Th.bdStruct;
11 v1 = [2 3 1]; v2 = [3 1 2];
12 bdIndex = bdStruct.bdIndex; E = false(NE,1); E(bdIndex) = 1;
13 sgnelem = sign(elem(:,v2)-elem(:,v1));
14 sgnbd = E(elem2edge); sgnelem(sgnbd) = 1;
15 sgnelem(sgnelem== -1) = 0;
16 elema = elem2edge + N*sgnelem + (N+NE)*(~sgnelem); % 1/3 point
17 elemb = elem2edge + (N+NE)*sgnelem + N*(~sgnelem); % 2/3 point
18 % local --> global
19 elem2dof = [elem, elema, elemb, (1:NT)' + N + 2*NE];
20 end

```

注意, 一维边必须确定好定向再编号, 这里 `sgnelem` 起到该作用. 它是按单元给定的边符号, 若边是正定向 (人为规定的), 则对应 1, 否则对应 0. 为了方便处理边界, 边界边的定向始终规定为逆时针方向.

经过上面两步, 高阶元的程序就已经完成了. 为了计算误差阶, 我们还对应修改 `getL2error.m` 和 `getH1error.m`, 这里不再给出其程序. P2-Lagrange 元和 P3-Lagrange 元的误差阶图像如下



可以看到, 误差阶与理论结果相符. 类似地, 方法也存在半收敛现象, 不再给出.

7.6 线弹性问题的分块编程

7.6.1 第三种形式的变分问题

程序编写说明

根据线弹性问题的讨论, 双线性形式配对 (v_i, u_j) 对应分块刚度矩阵的 A_{ij} 块, 而每个块都类似 Poisson 方程处理. 针对块结构, 我们可用 int2d.m 等编写线弹性问题的程序. 先考虑第三种形式, 即

$$\begin{aligned} \mu \int_{\Omega} \nabla \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{v} dx + (\lambda + \mu) \int_{\Omega} (\operatorname{div} \mathbf{u})(\operatorname{div} \mathbf{v}) dx \\ - \mu \int_{\partial\Omega} \partial_n \mathbf{u} \cdot \mathbf{v} ds - (\lambda + \mu) \int_{\partial\Omega} (\operatorname{div} \mathbf{u})(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) ds = \int_{\Omega} \mathbf{f} \cdot \mathbf{v} dx. \end{aligned}$$

注意, 该问题仅考虑 Dirichlet 边界条件.

双线性的第一部分可分为

$$\mu \int_{\Omega} \nabla u_1 \cdot \nabla v_1 dx \quad \text{和} \quad \mu \int_{\Omega} \nabla u_2 \cdot \nabla v_2 dx,$$

它们产生的矩阵相同, 记为 A , 分别对应块 A_{11} 和 A_{22} . 程序如下

```
1 % (u1.grad, v1.grad), (u2.grad, v2.grad)
2 cf = @(p) mu + 0*p(:,1);
3 Coef = {cf}; Trial = {'u.grad'}; Test = {'v.grad'};
4 A = int2d(Th,Coef,Trial,Test,feSpace,quadOrder);
```

双线性的第二部分可分为

$$\int_{\Omega} v_{1,x} u_{1,x} dx, \quad \int_{\Omega} v_{1,x} u_{2,y} dx, \quad \int_{\Omega} v_{2,x} u_{1,x} dx \quad \text{和} \quad \int_{\Omega} v_{2,x} u_{2,y} dx,$$

它们分别对应块 A_{11} , A_{12} , A_{21} 和 A_{22} . 第 1 个和第 3 个产生的矩阵相同, 记为 B_1 , 第 2 个和第 4 个产生的矩阵相同, 记为 B_2 . 程序如下

```
1 % (v1.dx, u1.dx) and (v2.dx, u1.dx)
2 cf = @(p) lambda+mu + 0*p(:,1);
3 Coef = {cf}; Trial = {'u.dx'}; Test = {'v.dx'};
4 B1 = int2d(Th,Coef,Trial,Test,feSpace,quadOrder);
5
6 % (v1.dx, u2.dy) and (v2.dx, u2.dy)
7 cf = @(p) lambda+mu + 0*p(:,1);
8 Coef = {cf}; Trial = {'u.dy'}; Test = {'v.dx'};
9 B2 = int2d(Th,Coef,Trial,Test,feSpace,quadOrder);
```

这样, 分块刚度矩阵为

```
1 % kk
2 kk = [A+B1,      B2;
3          B1,      A+B2];
```

载荷向量的两个部分

$$\int_{\Omega} v_1 f_1 dx \quad \text{和} \quad \int_{\Omega} v_2 f_2 dx$$

分别对应 F_1 和 F_2 , 程序如下

```
1 % F1
2 trf = eye(2);
3 Coef = @(pz) pde.f(pz)*trf(:, 1); Test = 'v.val';
4 F1 = int2d(Th, Coef, [], Test, feSpace, quadOrder);
5
6 % F2
7 trf = eye(2);
8 Coef = @(pz) pde.f(pz)*trf(:, 2); Test = 'v.val';
9 F2 = int2d(Th, Coef, [], Test, feSpace, quadOrder);
10
11 % F
12 ff = [F1; F2];
```

边界条件与 elasticity3.m 的处理相同.

程序整理

以上说明整理为如下函数

```
1 function u = elasticity3_variationalBlock(Th, pde, feSpace, quadOrder)
2
3 % Quadrature orders for int1d and int2d
4 if nargin==2, feSpace = 'P1'; quadOrder = 3; end % default: P1
5 if nargin==3, quadOrder = 3; end
6
7 % ----- Mesh Th -----
8 node = Th.node; bdStruct = Th.bdStruct; N = size(node, 1);
9 mu = pde.mu; lambda = pde.lambda;
10
11 % ----- Stiffness matrix -----
12 % (u1.grad, v1.grad), (u2.grad, v2.grad)
```

```

13 cf = @(p) mu + 0*p(:,1);
14 Coef = {cf}; Trial = {'u.grad'}; Test = {'v.grad'};
15 A = int2d(Th,Coef,Trial,Test,feSpace,quadOrder);
16
17 % (v1.dx, u1.dx) and (v2.dx, u1.dx)
18 cf = @(p) lambda+mu + 0*p(:,1);
19 Coef = {cf}; Trial = {'u.dx'}; Test = {'v.dx'};
20 B1 = int2d(Th,Coef,Trial,Test,feSpace,quadOrder);
21
22 % (v1.dx, u2.dy) and (v2.dx, u2.dy)
23 cf = @(p) lambda+mu + 0*p(:,1);
24 Coef = {cf}; Trial = {'u.dy'}; Test = {'v.dx'};
25 B2 = int2d(Th,Coef,Trial,Test,feSpace,quadOrder);
26
27 % kk
28 kk = [A+B1, B2;
29 B1, A+B2];
30
31 % ----- Load vector -----
32 % F1
33 trf = eye(2);
34 Coef = @(pz) pde.f(pz)*trf(:, 1); Test = 'v.val';
35 F1 = int2d(Th,Coef,[],Test,feSpace,quadOrder);
36
37 % F2
38 trf = eye(2);
39 Coef = @(pz) pde.f(pz)*trf(:, 2); Test = 'v.val';
40 F2 = int2d(Th,Coef,[],Test,feSpace,quadOrder);
41
42 % F
43 ff = [F1; F2];
44
45 % ----- Dirichlet boundary condition -----
46 g_D = pde.g_D; eD = bdStruct.eD;
47 id = [eD; eD+N];
48 isBdNode = false(2*N,1); isBdNode(id) = true;
49 bdDof = (isBdNode); freeDof = (~isBdNode);
50 pD = node(eD,:);
51 u = zeros(2*N,1); uD = g_D(pD); u(bdDof) = uD(:);
52 ff = ff - kk*u;

```

```

53
54 % ----- Solver -----
55 u(freeDof) = kk(freeDof,freeDof)\ff(freeDof);

```

主程序

主程序如下

```

1 clc;clear;close all
2 % ----- Mesh and boudary conditions -----
3 g = [2 2 2 2 2 2 % decomposed geometry matrix
4     0 1 1 -1 -1 0
5     1 1 -1 -1 0 0
6     0 0 1 1 -1 -1
7     0 1 1 -1 -1 0
8     1 1 1 1 1 1
9     0 0 0 0 0 0];
10 [p,e,t] = initmesh(g,'hmax',1); % initial mesh
11
12 bdNeumann = []; % only Dirichlet condition for elasticity3
13
14 % ----- PDE data -----
15 lambda = 1; mu = 1;
16 para.lambda = lambda; para.mu = mu;
17 pde = elasticitydata(para);
18
19 % ----- elasticity1 -----
20 maxIt = 5;
21 N = zeros(maxIt,1); h = zeros(maxIt,1);
22 ErrL2 = zeros(maxIt,1); ErrH1 = zeros(maxIt,1);
23 errwL2 = zeros(maxIt,1); errwH1 = zeros(maxIt,1);
24 for k = 1:maxIt
25     [p,e,t] = refinemesh(g,p,e,t); % refine mesh
26     node = p'; elem = t(1:3,:)';
27     bdStruct = setboundary(node,elem,bdNeumann);
28     Th.node = node; Th.elem = elem; Th.bdStruct = bdStruct;
29     uh = elasticity3_variational(Th,pde);
30     uh = reshape(uh,[],2);
31     NT = size(elem,1); h(k) = 1/sqrt(NT);
32

```

```

33     tru = eye(2); trDu = eye(4);
34     errL2 = zeros(1,2); errH1 = zeros(1,2); % square
35     for id = 1:2
36         uid = uh(:,id);
37         u = @(pz) pde.uexact(pz)*tru(:, id);
38         Du = @(pz) pde.Du(pz)*trDu(:, 2*id-1:2:id);
39         errL2(:,id) = getL2error(node, elem, uid, u);
40         errH1(:,id) = getH1error(node, elem, uid, Du);
41     end
42
43     ErrL2(k) = sqrt(sum(errL2.^2,2));
44     ErrH1(k) = sqrt(sum(errH1.^2,2));
45 end
46
47 % ----- Plot convergence rates -----
48 figure;
49 showrateh(h, ErrL2, ErrH1);

```

误差阶图像与 main_elasticity3.m 的结果一致.

7.6.2 第二种形式的变分问题

程序编写说明

双线性形式为

$$a(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = 2\mu \int_{\Omega} \varepsilon_{ij}(\mathbf{u}) \varepsilon_{ij}(\mathbf{v}) dx + \lambda \int_{\Omega} (\partial_i u_i)(\partial_j v_j) dx,$$

右端的线性形式为

$$\ell(\mathbf{v}) = \int_{\Omega} \mathbf{f} \cdot \mathbf{v} dx + \int_{\Gamma_1} \mathbf{g} \cdot \mathbf{v} ds.$$

先考虑双线性形式. 被积函数是

$$v_{i,x}u_{j,x}, \quad v_{i,x}u_{j,y}, \quad v_{i,y}u_{j,x} \quad \text{和} \quad v_{i,y}u_{j,y}, \quad 1 \leq i, j \leq 2$$

的组合, 而且每种求导对应的矩阵是相同的 (即对不同的配对 (i, j)), 它们如下获得.

```

1 % ----- matrices of all pairs -----
2 % (vi.dx, uj.dx)
3 cf = 1;
4 Coef = {cf}; Trial = {'u.dx'}; Test = {'v.dx'};
5 A1 = int2d(Th, Coef, Trial, Test, feSpace, quadOrder);

```

```

6 % (vi.dx, uj.dy)
7 cf = 1;
8 Coef = {cf}; Trial = {'u.dy'}; Test = {'v.dx'};
9 A2 = int2d(Th,Coef,Trial,Test,feSpace,quadOrder);
10 % (vi.dy, uj.dx)
11 cf = 1;
12 Coef = {cf}; Trial = {'u.dx'}; Test = {'v.dy'};
13 A3 = int2d(Th,Coef,Trial,Test,feSpace,quadOrder);
14 % (vi.dy, uj.dy)
15 cf = 1;
16 Coef = {cf}; Trial = {'u.dy'}; Test = {'v.dy'};
17 A4 = int2d(Th,Coef,Trial,Test,feSpace,quadOrder);

```

易知, 第一部分的刚度矩阵如下

```

1 % (Eij(u):Eij(v))
2 A = [ A1 + 0.5*A4,           0.5*A3;
3                 0.5*A2           0.5*A1 + A4 ];
4 A = 2*mu*A;

```

第二部分的刚度矩阵如下

```

1 % (div u,div v)
2 B = [ A1,     A2;
3       A3     A4 ];
4 B = lambda*B;

```

最终的刚度矩阵为

```

1 % stiffness matrix
2 kk = A + B;

```

接着计算线性形式. 线性形式的第一项与第三种变分形式一致, 我们考虑第二项

$$\int_{\Gamma_1} \mathbf{g} \cdot \mathbf{v} ds.$$

PDE 数据中给定的 \mathbf{g}_N 为 $\mathbf{g}_N = [\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{12}]$, 令

$$g_1 = [\varepsilon_{11}, \varepsilon_{12}], \quad g_2 = [\varepsilon_{12}, \varepsilon_{22}],$$

则它们相当于 ∇u , 通过截取分量获得. Neumann 边界条件如下处理

```

1 % ----- Neumann boundary condition -----

```

```

2 if ~isempty(Th.elem1D)
3     g_N = pde.g_N; trg = eye(3);
4
5     g1 = @(p) g_N(p)*trg(:,[1,3]);
6     Cmat1 = getMat1d(g1, Th, quadOrder);
7     Coef = Cmat1; Test = 'v.val';
8     F1 = F1 + int1d(Th, Coef, [], Test, feSpace, quadOrder);
9
10    g2 = @(p) g_N(p)*trg(:,[3,2]);
11    Cmat2 = getMat1d(g2, Th, quadOrder);
12    Coef = Cmat2; Test = 'v.val';
13    F2 = F2 + int1d(Th, Coef, [], Test, feSpace, quadOrder);
14 end

```

程序整理

函数文件如下

```

1 function u = elasticity2_variationalBlock(Th, pde, feSpace, quadOrder)
2
3 % Quadrature orders for int1d and int2d
4 if nargin==2, feSpace = 'P1'; quadOrder = 3; end % default: P1
5 if nargin==3, quadOrder = 3; end
6
7 % ----- Mesh Th -----
8 node = Th.node; elem = Th.elem; bdStruct = Th.bdStruct;
9 Th.elem1D = bdStruct.elemN; Th.bdIndex1D = bdStruct.bdIndexN;
10 N = size(node,1);
11 mu = pde.mu; lambda = pde.lambda;
12
13 % ----- matrices of all pairs -----
14 % (vi.dx, uj.dx)
15 cf = 1;
16 Coef = {cf}; Trial = {'u.dx'}; Test = {'v.dx'};
17 A1 = int2d(Th, Coef, Trial, Test, feSpace, quadOrder);
18 % (vi.dx, uj.dy)
19 cf = 1;
20 Coef = {cf}; Trial = {'u.dy'}; Test = {'v.dx'};
21 A2 = int2d(Th, Coef, Trial, Test, feSpace, quadOrder);
22 % (vi.dy, uj.dx)

```

```

23 cf = 1;
24 Coef = {cf}; Trial = {'u.dx'}; Test = {'v.dy'};
25 A3 = int2d(Th,Coef,Trial,Test,feSpace,quadOrder);
26 % (vi.dy, uj.dy)
27 cf = 1;
28 Coef = {cf}; Trial = {'u.dy'}; Test = {'v.dy'};
29 A4 = int2d(Th,Coef,Trial,Test,feSpace,quadOrder);
30
31 % ----- Stiffness matrix -----
32 % (Eij(u):Eij(v))
33 A = [ A1 + 0.5*A4, 0.5*A3;
34 0.5*A2 0.5*A1 + A4 ];
35 A = 2*mu*A;
36
37 % (div u,div v)
38 B = [ A1, A2;
39 A3 A4 ];
40 B = lambda*B;
41
42 % stiffness matrix
43 kk = A + B;
44
45 % ----- Load vector -----
46 % F1
47 trf = eye(2);
48 Coef = @(pz) pde.f(pz)*trf(:, 1); Test = 'v.val';
49 F1 = int2d(Th,Coef,[],Test,feSpace,quadOrder);
50
51 % F2
52 trf = eye(2);
53 Coef = @(pz) pde.f(pz)*trf(:, 2); Test = 'v.val';
54 F2 = int2d(Th,Coef,[],Test,feSpace,quadOrder);
55
56 % ----- Neumann boundary condition -----
57 if ~isempty(Th.elem1D)
58 g_N = pde.g_N; trg = eye(3);
59
60 g1 = @(p) g_N(p)*trg(:,[1,3]);
61 Cmat1 = getMat1d(g1,Th,quadOrder);
62 Coef = Cmat1; Test = 'v.val';

```

```

63     F1 = F1 + int1d(Th,Coef,[] ,Test,feSpace,quadOrder);
64
65     g2 = @(p) g_N(p)*trg(:,[3,2]);
66     Cmat2 = getMat1d(g2, Th, quadOrder);
67     Coef = Cmat2; Test = 'v.val';
68     F2 = F2 + int1d(Th,Coef,[] ,Test,feSpace,quadOrder);
69 end
70
71 % load vector
72 ff = [F1; F2];
73
74 % ----- Dirichlet boundary condition -----
75 g_D = pde.g_D; eD = bdStruct.eD;
76 id = [eD; eD+N];
77 isBdNode = false(2*N,1); isBdNode(id) = true;
78 bdDof = (isBdNode); freeDof = (~isBdNode);
79 pD = node(eD,:);
80 u = zeros(2*N,1); uD = g_D(pD); u(bdDof) = uD(:);
81 ff = ff - kk*u;
82
83 % ----- Solver -----
84 u(freeDof) = kk(freeDof,freeDof)\ff(freeDof);

```

主程序

误差阶与 main_elasticity2.m 的结果一致, 主程序如下

```

1 clc;clear;close all
2 % ----- Mesh and boudary conditions -----
3 a1 = 0; b1 = 1; a2 = 0; b2 = 1;
4 Nx = 4; Ny = 4; h1 = (b1-a1)/Nx; h2 = (b2-a2)/Ny;
5 [node,elem] = squaremesh([a1 b1 a2 b2],h1,h2);
6
7 bdNeumann = 'abs(y-0)<1e-4 | abs(x-1)<1e-4'; % string for Neumann
8
9 % ----- PDE data -----
10 lambda = 1; mu = 1;
11 para.lambda = lambda; para.mu = mu;
12 pde = elasticitydata(para);
13

```

```

14 % ----- elasticity1 -----
15 maxIt = 5;
16 N = zeros(maxIt,1); h = zeros(maxIt,1);
17 ErrL2 = zeros(maxIt,1); ErrH1 = zeros(maxIt,1);
18 errwL2 = zeros(maxIt,1); errwH1 = zeros(maxIt,1);
19 for k = 1:maxIt
20     [node, elem] = uniformrefine(node, elem);
21     bdStruct = setboundary(node, elem, bdNeumann);
22     Th.node = node; Th.elem = elem; Th.bdStruct = bdStruct;
23     uh = elasticity2_variationalBlock(Th, pde);
24     uh = reshape(uh, [], 2);
25     NT = size(elem,1); h(k) = 1/sqrt(NT);
26
27     tru = eye(2); trDu = eye(4);
28     errL2 = zeros(1,2); errH1 = zeros(1,2); % square
29     for id = 1:2
30         uid = uh(:,id);
31         u = @(pz) pde.uexact(pz)*tru(:, id);
32         Du = @(pz) pde.Du(pz)*trDu(:, 2*id-1:2:id);
33         errL2(:,id) = getL2error(node, elem, uid, u);
34         errH1(:,id) = getH1error(node, elem, uid, Du);
35     end
36
37     ErrL2(k) = sqrt(sum(errL2.^2, 2));
38     ErrH1(k) = sqrt(sum(errH1.^2, 2));
39 end
40
41 % ----- Plot convergence rates -----
42 figure;
43 showrateh(h, ErrL2, ErrH1);

```

第八章 向量有限元的基于变分形式的程序设计

根据线弹性问题的讨论, 向量有限元的程序可以按照块结构进行标量法编程, 其中每个块都对应标量有限元的规模. 当标量有限元的自由度非常多时, 分块编程会出现内存溢出. 为此, 本章采用 `sparse` 装配法来设计向量有限元的基于变分形式的程序.

8.1 `int2dvec` 函数

8.1.1 组合型配对的处理

以线弹性边值问题的第二种变分形式为例进行说明. 双线性形式和右端线性形式分别为

$$a(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = 2\mu \int_{\Omega} \varepsilon_{ij}(\mathbf{u}) \varepsilon_{ij}(\mathbf{v}) dx + \lambda \int_{\Omega} (\partial_i u_i)(\partial_j v_j) dx$$

和

$$\ell(\mathbf{v}) = \int_{\Omega} \mathbf{f} \cdot \mathbf{v} dx + \int_{\Gamma_1} \mathbf{g} \cdot \mathbf{v} ds.$$

先考虑双线性形式第一项中的

$$\int_{\Omega} \varepsilon_{ij}(\mathbf{u}) \varepsilon_{ij}(\mathbf{v}) dx.$$

注意到

$$\varepsilon_{ij}(\mathbf{u}) \varepsilon_{ij}(\mathbf{v}) = v_{1,x} u_{1,x} + v_{2,y} u_{2,y} + \frac{1}{2} (v_{1,y} + v_{2,x})(u_{1,y} + u_{2,x}), \quad (8.1)$$

我们希望实现如下的对应

```
1 Coef = { 1, 1, 0.5 };
2 Trial = {'u1.dx', 'u2.dy', 'u1.dy + u2.dx'};
3 Test = {'v1.dx', 'v2.dy', 'v1.dy + v2.dx'};
4 A = int2dvec(Th, Coef, Trial, Test, feSpace, quadOrder);
```

显然线性组合的配对 '`u1.dy + u2.dx`' 和 '`v1.dy + v2.dx`' 在计算的过程中还需要交叉相乘得

```
1 cvu = { 1, 1, 1, 1 };
2 strv = {'v1.dy', 'v1.dy', 'v2.dx', 'v2.dx'};
3 stru = {'u1.dy', 'u2.dx', 'u1.dy', 'u2.dy'};
```

从而获得新的 `Coef`, `Trial` 和 `Test` (注意组合配对的系数要乘以原来的系数). 从应用的角度来说, 组合配对前的系数一般与 PDE 的数据相关, 但线性组合的系数通常是常数, 本文也只考虑这种情形.

线性组合的配对项数不必相同, 为此考虑如下的配对

```
1 strv = 'v1.dx + 2*v2.val';
2 stru = '3*u1.val + 2*u2.dx + u2.val';
```

1. 实现交叉相乘的第一步是根据 '+' 进行字符拆分。考虑到空格问题，我们首先去除 strv 和 stru 中的空格。

```
1 % remove spaces
2 strv = strrep(strv, ' ', '');
3 stru = strrep(stru, ' ', '');
```

接着进行字符拆分

```
1 % pairs: split on '+'
2 strv = strsplitsplit(strv, '+');
3 stru = strsplitsplit(stru, '+');
```

结果为

```
1 strv = {'v1.dx', '2*v2.val'};
2 stru = {'3*u1.val', '2*u2.dx', 'u2.val'};
```

2. 为了获得交叉相乘的三元组 Coef, Trial, Test, 我们根据 '*' 进行字符拆分。

```
1 % triples: split on '*'
2 nv      = length(strv);      nu      = length(stru);
3 cvv     = cell(1,nv);        cuu     = cell(1,nu);
4 strvv  = cell(1,nv);        struu  = cell(1,nu);
5 for i = 1:nv
6     str = strv{i}; str = strsplitsplit(str, '*');
7     if length(str)==1, cvv{i} = 1; strvv{i} = str{1}; end
8     if length(str)==2, cvv{i} = str2double(str{1}); strvv{i} = ...
9         str{2}; end
10    end
11    for i = 1:nu
12        str = stru{i}; str = strsplitsplit(str, '*');
13        if length(str)==1, cuu{i} = 1; struu{i} = str{1}; end
14        if length(str)==2, cuu{i} = str2double(str{1}); struu{i} = ...
15            str{2}; end
16    end
17
```

这里, `cvv` 存储 `strv` 中各组份的系数, `strvv` 存储去除系数的字符. 当组份中无 '*' 时, 字符串不会拆分, 因而个数为 1, 此时系数为 1; 当有 '*' 时, 字符串拆分为 2 个, 第一个为系数, 第二个为去除系数的字符.

3. 最后交叉组合即可获得三元组.

```

1 % cross pairs: Coef, Trial, Test
2 % Coef
3 cvv = repmat(cvv, 1, nu);
4 Coef1 = cvv([1:2:end, 2:2:end]);
5 Coef2 = repmat(cuu, 1, nv);
6 Coef = cellfun(@(x,y) x*y, Coef1, Coef2, 'UniformOutput', false);
7 % Test
8 strvv = repmat(strvv, 1, nu);
9 Test = strvv([1:2:end, 2:2:end]);
10 % Trial
11 Trial = repmat(struu, 1, nv);

```

以上的说明编写为函数文件

```

1 [Coef,Trial,Test] = getvarForm(stru, strv);

```

有了该函数, (8.1) 对应的完全三元组如下获得.

```

1 Coef = { 1, 1, 0.5 }; % may be function handles
2 Trial = {'u1.dx', 'u2.dy', 'u1.dy + u2.dx'};
3 Test = {'v1.dx', 'v2.dy', 'v1.dy + v2.dx'};
4
5 cc = cell(1,length(Coef)); uu = cc; vv = cc;
6 for ss = 1:length(Test)
7     stru = Trial{ss}; strv = Test{ss};
8     [cs, us, vs] = getvarForm(stru, strv);
9     cf = Coef{ss};
10    for i = 1:length(cs)
11        if isnumeric(cf), cs{i} = cf*cs{i}; end
12        if isa(cf, 'function_handle'), cs{i} = @(p) cf(p)*cs{i}; end
13    end
14    cc{ss} = cs; uu{ss} = us; vv{ss} = vs;
15 end
16
17 Coef = horzcat(cc{:});

```

```
18 Trial = horzcat(uu{:});  
19 Test = horzcat(vv{:});
```

结果为

```
1 Coef = {1, 1, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5};  
2 Trial = {'u1.dx', 'u2.dy', 'u1.dy', 'u2.dx', 'u1.dy', 'u2.dx'};  
3 Test = {'v1.dx', 'v2.dy', 'v1.dy', 'v1.dy', 'v2.dx', 'v2.dx'};
```

8.1.2 双线性形式的计算

有了完全三元组, 我们就可以计算双线性形式对应的矩阵了. 这里实际上存在一个问题, 就是会重复计算很多配对. 例如, 第一个和最后一个都是 ('.dx', '.dx') 型的配对, 它们对应相同的矩阵. 注意到系数 Coef 不一定相同, 为了一般性, 暂时不处理该问题.

根据上一小节的说明, 我们获得了扩展后的三元组 Coef, Trial, Test.

向量方程的装配指标为

```
1 %% ----- Sparse assembling index of Pk-Lagrange element -----  
2 % elementwise d.o.f.s  
3 [elem2dof, Ndof, NNdof] = dof2d(Th, feSpace);  
4  
5 % assembling index  
6 NT = size(Th.elem, 1);  
7 nnz = NT*Ndof^2;  
8 ii = zeros(nnz, 1); jj = zeros(nnz, 1); id = 0;  
9 for i = 1:Ndof  
10     for j = 1:Ndof  
11         ii(id+1:id+NT) = elem2dof(:, i); % zi  
12         jj(id+1:id+NT) = elem2dof(:, j); % zj  
13         id = id + NT;  
14     end  
15 end  
16  
17 ii11 = ii; jj11 = jj; ii12 = ii; jj12 = jj+NNdof;  
18 ii21 = ii+NNdof; jj21 = jj; ii22 = ii+NNdof; jj22 = jj+NNdof;  
19  
20 ii = [ii11; ii12; ii21; ii22];  
21 jj = [jj11; jj12; jj21; jj22];
```

接着, 我们要获得分块刚度矩阵的每一个块对应的 ss. 例如, ss11 如下计算

```

1 % (v1,u1)
2 id11 = contains(Test,'1') & contains(Trial,'1');
3 Coef11 = Coef(id11); Trial11 = Trial(id11); Test11 = Test(id11);
4 [~, ss11] = int2d(Th,Coef11,Trial11,Test11,feSpace,quadOrder);

```

注意, 在 `int2d` 中我们新增了第二个输出 `K(:)`, 其中 `K` 是装配中给出的行拉直存储矩阵, 如 $K = [k_{11}, k_{12}, k_{13}, k_{21}, k_{22}, k_{23}, k_{31}, k_{32}, k_{33}]$. 上面一段代码中, `id11` 是获得 (v_1, u_1) 型的所有配对, 接着按照标量情形计算. 类似可获得其他配对. 下面用循环实现.

```

1 ss = zeros(nnz,4); k = 1;
2 % (vi,uj)
3 for i = 1:2
4     for j = 1:2
5         id = contains(Test,sprintf('%d',i)) & ...
6             contains(Trial,sprintf('%d',j));
7         [~, ss(:,k)] = ...
8             int2d(Th,Coef(id),Trial(id),Test(id),feSpace,quadOrder);
9         k = k+1;
10    end
11 end
12 ss = ss(:);
13 output = sparse(ii,jj,ss,2*NNdof,2*NNdof);

```

综上, 双线性形式如下计算.

```

1 function output = int2dvec(Th,Coef,Trial,Test,feSpace,quadOrder)
2
3 if nargin == 4, feSpace = 'P1'; quadOrder = 3; end % default: P1
4 if nargin == 5, quadOrder = 3; end
5
6 %% ----- extended [Coef,Trial,Test] -----
7 if isempty(Trial)
8     cc = cell(1,length(Coef)); uu = cc; vv = cc;
9     for ss = 1:length(Test)
10         stru = Trial{ss}; strv = Test{ss};
11         [cs, us, vs] = getvarForm(stru, strv);
12         cf = Coef{ss};
13         for i = 1:length(cs)
14             if isnumeric(cf), cs{i} = cf*cs{i}; end
15             if isa(cf, 'function_handle'), cs{i} = @(p) ...

```

```

        cf(p)*cs{i}; end
16    end
17    cc{ss} = cs; uu{ss} = us; vv{ss} = vs;
18 end
19
20 Coef = horzcat(cc{:});
21 Trial = horzcat(uu{:});
22 Test = horzcat(vv{:});
23 end
24 %% ----- Sparse assembling index of Pk-Lagrange element -----
25 % elementwise d.o.f.s
26 [elem2dof,Ndof,NNdof] = dof2d(Th,feSpace);
27
28 % assembling index
29 NT = size(Th.elem,1);
30 nnz = NT*Ndof^2;
31 ii = zeros(nnz,1); jj = zeros(nnz,1); id = 0;
32 for i = 1:Ndof
33     for j = 1:Ndof
34         ii(id+1:id+NT) = elem2dof(:,i); % zi
35         jj(id+1:id+NT) = elem2dof(:,j); % zj
36         id = id + NT;
37     end
38 end
39
40 ii11 = ii; jj11 = jj; ii12 = ii; jj12 = jj+NNdof;
41 ii21 = ii+NNdof; jj21 = jj; ii22 = ii+NNdof; jj22 = jj+NNdof;
42
43 ii = [ii11; ii12; ii21; ii22];
44 jj = [jj11; jj12; jj21; jj22];
45
46 %% ----- Bilinear form -----
47 if ~isempty(Trial)
48     ss = zeros(nnz,4); k = 1;
49     % (vi,uj)
50     for i = 1:2
51         for j = 1:2
52             id = contains(Test, sprintf('%d',i)) & ...
53                 contains(Trial, sprintf('%d',j));
54             [~, ss(:,k)] = ...

```

```

    int2d(Th,Coef(id),Trial(id),Test(id),feSpace,quadOrder);

54         k = k+1;

55     end

56 end

57 ss = ss(:);

58 output = sparse(ii,jj,ss,2*NNdof,2*NNdof);

59 return; % The remaining code will be neglected.

60 end

```

8.1.3 线性形式的计算

区域上的线性形式默认为

$$\int_{\Omega} \mathbf{f} \cdot \mathbf{v} dx,$$

对应的载荷向量只需要按标量情形分块计算即可.

```

1 %% ----- Linear form -----
2 trf = eye(2); f = Coef;
3 Coef = @(pz) f(pz)*trf(:, 1); Test = 'v.val';
4 F1 = int2d(Th,Coef,[],Test,feSpace,quadOrder);
5 Coef = @(pz) f(pz)*trf(:, 2); Test = 'v.val';
6 F2 = int2d(Th,Coef,[],Test,feSpace,quadOrder);
7 output = [F1; F2];

```

8.2 int1dvec 函数

考虑到还未遇到一维向量型双线性形式，这里暂时只给出线性形式.

```

1 function output = int1dvec(Th,Coef,Trial,Test,feSpace,quadOrder)
2
3 if nargin == 4, feSpace = 'P1'; quadOrder = 3; end % default: P1
4 if nargin == 5, quadOrder = 3; end
5
6 %% ----- Bilinear form -----
7
8 %% ----- Linear form -----
9 if isa(Coef,'function_handle')
10     trf = eye(2); f = Coef;
11     Coef1 = @(pz) f(pz)*trf(:, 1); Coef2 = @(pz) f(pz)*trf(:, 2);
12     F1 = int1d(Th,Coef1,[],Test,feSpace,quadOrder);
13     F2 = int1d(Th,Coef2,[],Test,feSpace,quadOrder);

```

```

14 else
15     Coef1 = Coef{1}; Coef2 = Coef{2}; % matrix
16     F1 = int1d(Th,Coef1,[],Test,feSpace,quadOrder);
17     F2 = int1d(Th,Coef2,[],Test,feSpace,quadOrder);
18 end
19 output = [F1; F2];

```

8.3 线弹性边值问题

8.3.1 函数文件

考虑第二种形式，根据前面的说明，函数文件可如下编写.

```

1 function u = elasticity2_variational(Th,pde,feSpace,quadOrder)
2
3 % Quadrature orders for int1d and int2d
4 if nargin==2, feSpace = 'P1'; quadOrder = 3; end % default: P1
5 if nargin==3, quadOrder = 3; end
6
7 % ----- Mesh Th -----
8 node = Th.node; elem = Th.elem; bdStruct = Th.bdStruct;
9 Th.elem1D = bdStruct.elemN; Th.bdIndex1D = bdStruct.bdIndexN;
10 N = size(node,1);
11 mu = pde.mu; lambda = pde.lambda;
12
13 % ----- Stiffness matrix -----
14 % (Eij(u):Eij(v))
15 Coef = { 1, 1, 0.5 };
16 Trial = {'u1.dx', 'u2.dy', 'u1.dy + u2.dx'};
17 Test = {'v1.dx', 'v2.dy', 'v1.dy + v2.dx'};
18 A = int2dvec(Th,Coef,Trial,Test,feSpace,quadOrder);
19 A = 2*mu*A;
20
21 % (div u,div v)
22 Coef = { 1 };
23 Trial = { 'u1.dx + u2.dy' };
24 Test = { 'v1.dx + v2.dy' };
25 B = int2dvec(Th,Coef,Trial,Test,feSpace,quadOrder);
26 B = lambda*B;
27

```

```

28 % stiffness matrix
29 kk = A + B;
30
31 % ----- Load vector -----
32 Coef = pde.f; Test = 'v.val';
33 ff = int2dvec(Th,Coef,[],Test,feSpace,quadOrder);
34
35 % ----- Neumann boundary condition -----
36 if ~isempty(Th.elem1D)
37     g_N = pde.g_N; trg = eye(3);
38
39     g1 = @(p) g_N(p)*trg(:,[1,3]); Cmat1 = getMat1d(g1,Th,quadOrder);
40     g2 = @(p) g_N(p)*trg(:,[3,2]); Cmat2 = getMat1d(g2,Th,quadOrder);
41
42     Coef = {Cmat1, Cmat2}; Test = 'v.val';
43     ff = ff + int1dvec(Th,Coef,[],Test,feSpace,quadOrder);
44 end
45
46 % ----- Dirichlet boundary condition -----
47 g_D = pde.g_D; eD = bdStruct.eD;
48 id = [eD; eD+N];
49 isBdNode = false(2*N,1); isBdNode(id) = true;
50 bdDof = (isBdNode); freeDof = (~isBdNode);
51 pD = node(eD,:);
52 u = zeros(2*N,1); uD = g_D(pD); u(bdDof) = uD(:);
53 ff = ff - kk*u;
54
55 % ----- Solver -----
56 u(freeDof) = kk(freeDof,freeDof)\ff(freeDof);

```

8.3.2 主程序

误差阶如下计算.

```

1 clc;clear;close all
2 tic;
3 % ----- Mesh and boudary conditions -----
4 a1 = 0; b1 = 1; a2 = 0; b2 = 1;
5 Nx = 4; Ny = 4; h1 = (b1-a1)/Nx; h2 = (b2-a2)/Ny;
6 [node,elem] = squaremesh([a1 b1 a2 b2],h1,h2);

```

```

7
8 bdNeumann = 'abs(y-0)<1e-4 | abs(x-1)<1e-4'; % string for Neumann
9
10 % ----- PDE data -----
11 lambda = 1; mu = 1;
12 para.lambda = lambda; para.mu = mu;
13 pde = elasticitydata(para);
14
15 % ----- elasticity1 -----
16 maxIt = 5;
17 N = zeros(maxIt,1); h = zeros(maxIt,1);
18 ErrL2 = zeros(maxIt,1); ErrH1 = zeros(maxIt,1);
19 errwL2 = zeros(maxIt,1); errwH1 = zeros(maxIt,1);
20 for k = 1:maxIt
21     [node,elem] = uniformrefine(node,elem);
22     bdStruct = setboundary(node,elem,bdNeumann);
23     Th.node = node; Th.elem = elem; Th.bdStruct = bdStruct;
24     uh = elasticity2_variational(Th,pde);
25     uh = reshape(uh,[],2);
26     NT = size(elem,1); h(k) = 1/sqrt(NT);
27
28     tru = eye(2); trDu = eye(4);
29     errL2 = zeros(1,2); errH1 = zeros(1,2); % square
30     for id = 1:2
31         uid = uh(:,id);
32         u = @(pz) pde.uexact(pz)*tru(:, id);
33         Du = @(pz) pde.Du(pz)*trDu(:, 2*id-1:2:id);
34         errL2(:,id) = getL2error(node,elem,uid,u);
35         errH1(:,id) = getH1error(node,elem,uid,Du);
36     end
37
38     ErrL2(k) = sqrt(sum(errL2.^2,2));
39     ErrH1(k) = sqrt(sum(errH1.^2,2));
40 end
41
42 % ----- Plot convergence rates -----
43 figure;
44 showrateh(h, ErrL2, ErrH1);
45 toc

```

第九章 自适应有限元方法

待整理.

9.1 自适应方法简介

9.1.1 后验误差估计

考虑 Poisson 方程的 Dirichlet 问题

$$\begin{cases} -\Delta u = f & \text{in } \Omega, \\ u = g & \text{on } \partial\Omega, \end{cases} \quad (9.1)$$

为了方便, 本文只考虑 $g = 0$ 的情形. 变分问题为: 找 $u \in V = H_0^1(\Omega)$ 使得

$$a(u, v) = \ell(v), \quad v \in V,$$

式中,

$$a(u, v) = \int_{\Omega} \nabla u \cdot \nabla v \, dx, \quad \ell(v) = \int_{\Omega} f v \, dx.$$

线性有限元方法为: 找 $u_h \in V_h$ 使得

$$a(u_h, v) = \ell(v), \quad v \in V_h, \quad (9.2)$$

这里, 有限元空间

$$V_h = \left\{ v \in H^1(\Omega) \cap C(\bar{\Omega}) : \quad v|_K \in \mathbb{P}_1(K) \quad \forall K \in \mathcal{T}_h, \quad v|_{\partial\Omega} = 0 \right\},$$

而 \mathcal{T}_h 是满足 shape regularity 条件的三角剖分, 这等价于最小角条件.

对协调有限元问题 (9.2), 利用 Ceá 引理, 误差估计转化为逼近算子 (例如插值算子) 的误差估计, 通常可建立如下的先验估计

$$\|u - u_h\|_{0,K} + h_K |u - u_h|_{1,K} \lesssim h_K^{s+1} |u|_{s+1,K}, \quad s \geq 0.$$

这里, 右端依赖于未知函数 u 的先验信息 (如 H^2 正则性), 因而称为先验估计.

后验误差估计是建立如下类型的估计

$$\|u - u_h\| \lesssim \eta(u_h),$$

式中, $\|\cdot\|$ 是某种范数或半范数, 用以度量误差, η 是与未知函数 u 无关的上界, 且与数值解 u_h 相关, 即 $\eta = \eta(u_h)$. 对问题 (9.2), 我们可建立如下的估计

$$|u - u_h|_1 \lesssim \eta(u_h),$$

式中,

$$\eta = \left(\sum_{K \in \mathcal{T}_h} \eta_K^2 \right)^{1/2}, \quad \eta_K^2 = h_K^2 \|f + \Delta u_h\|_{0,K}^2 + \sum_{e \in \partial K} h_e \|[\partial_{n_e} u_h]\|_{0,e}^2.$$

这里, $f + \Delta u_h$ 显然是数值解关于方程的残差, 注意, 对线性元 $\Delta u_h = 0$, 而

$$[\partial_{n_e} u_h] = \partial_{n_e} u_h|_{K_1} - \partial_{n_e} u_h|_{K_2}$$

为 $\partial_{n_e} u_h$ 跨单元时的跳量, n_e 是对应 K_1 的外法向量.

- 对给定的网格剖分 \mathcal{T}_h , 数值解在每个单元上计算的精度是不同的. 有些单元可能计算得好, 而有些单元可能计算得差, 这与区域以及解的正则性等都有关系. 例如, 对 L 型区域的角点附近, 通常网格剖分要细密一点, 否则这部分计算得就相对差一点. 再比如, 若精确解在某点附近有奇异性, 则这部分网格也要密一点.
- η_K 称为局部误差指示子 (local error indicator), 它的大小可用来度量单元 K 上的计算好坏. 当 η_K 较大时, 我们可以对该单元进行局部加密.

为了方便, 对 $\mathcal{M} \subset \mathcal{T}_h$, 定义

$$\eta(u_h, \mathcal{M}) = \left(\sum_{K \in \mathcal{M}} \eta_K^2 \right)^{1/2}.$$

显然, 有 $\eta(u_h) = \eta(u_h, \mathcal{T}_h)$.

9.1.2 加密或标记准则

现在给出一些局部加密的准则, 常用的有以下三种.

1. The error equidistribution strategy (误差均分策略)

给定 $\theta > 1$, 标记所有的单元 K^* , 满足

$$\eta_{K^*} \geq \theta \frac{\text{TOL}}{\sqrt{NT}},$$

式中, TOL 相当于迭代算法中停止的容许值, NT 是单元的总个数.

2. The maximum marking strategy (Babuska-Rheinboldt strategy)

标记所有的单元 K^* , 使得

$$\eta_{K^*} \geq \theta \max_{K \in \mathcal{T}_h} \eta_K, \quad \theta \in (0, 1).$$

3. The Dörfler bulk strategy

标记所有的单元 $K^* \subset \mathcal{M}_h$, 使得

$$\eta^2(u_h, \mathcal{M}_h) \geq \theta\eta^2, \quad \theta \in (0, 1),$$

这里, \mathcal{M}_h 是 \mathcal{T}_h 的子集. 注意, 通常将 η_K^2 从大到小排列, 找到最少的前若干项单元作为 \mathcal{M}_h .

9.1.3 有限元程序

为了方便操作, 我们先给出一个初始网格上的问题. 考虑 Dirichlet 问题 (9.1), 精确解设为

$$u(x, y) = xy(1 - x)(1 - y)\exp(-1000((x - 0.5)^2 + (y - 0.117)^2)),$$

区域 $\Omega = (0, 1)^2$, 此时 $g = 0$. 这个解衰减得很快, 它在 $(0.5, 0.117)$ 处的值要明显大于其他处的, 为此真正计算过程中, 只需要该点附近的网格细密就可 (不妨称为奇点).

根据二维问题的说明, 我们很容易给出有限元程序. 所有计算的过程编写成函数文件 Poisson.m, 如下使用 (见 GitHub 上传文件)

```
u = Poisson(node, elem, bdFlag, pde);
```

这里, `bdFlag` 是结构体, 用以存储边界条件信息 (见下面的 `setboundary.m`). `pde` 是方程信息, 由 `pdedata.m` 函数给出. 为了方便, 我们定义一个设置边界的函数 `setboundary.m`, 如下

```

1 function bdFlag = setboundary(node, a1, b1, a2, b2)
2
3 eps = 1e-4;
4 % ----- Set Dirichlet boundaries -----
5 idL = find(abs(node(:,1)-a1)≤eps); % left
6 idR = find(abs(node(:,1)-b1)≤eps); % right
7 idD = find(abs(node(:,2)-a2)≤eps); % down
8 idU = find(abs(node(:,2)-b2)≤eps); % upper
9 id = [idL; idR; idD; idU];
10 eD = unique(id); % node id of Dirichlet boundaries
11
12 % ----- Set Neumann boundaries -----
13 elemN = [];
14
15 bdFlag.eD = eD; bdFlag.elemN = elemN;

```

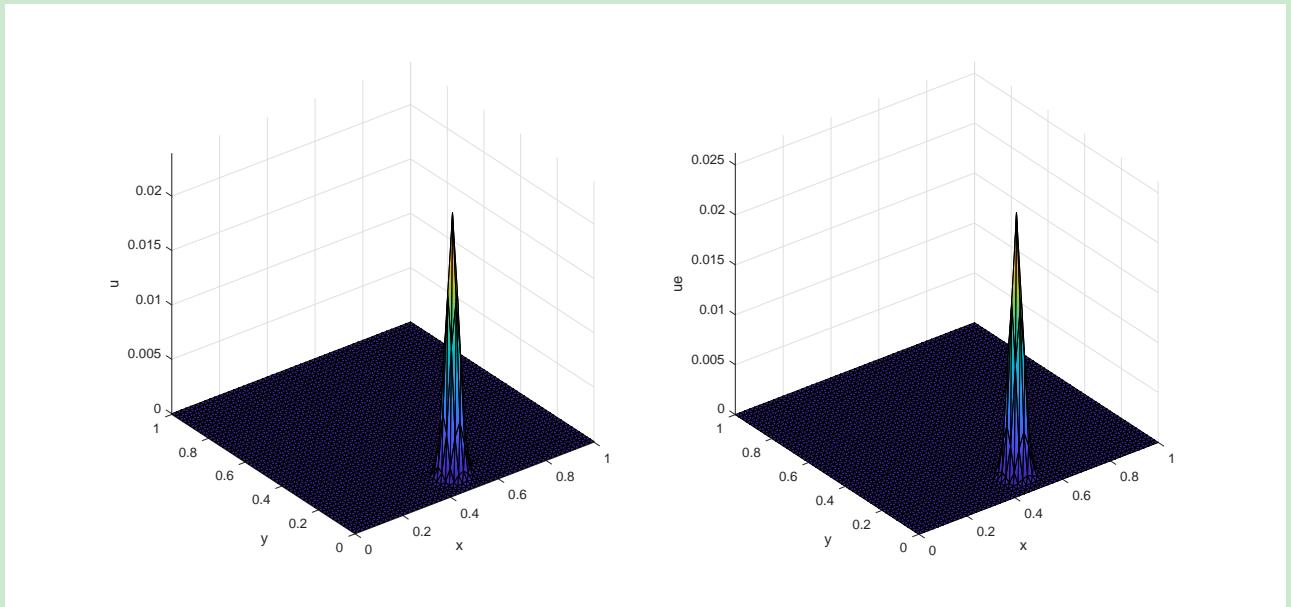
如下是主程序 (`mainFEM.m`)

```

1 clc;clear;close all;
2 % ----- Mesh and PDE -----
3 a1 = 0; b1 = 1; a2 = 0; b2 = 1;
4 Nx = 50; Ny = 50; h1 = 1/Nx; h2 = 1/Ny;
5 [node,elem] = squaremesh([a1 b1 a2 b2],h1,h2);
6 pde = pdedata();
7 bdFlag = setboundary(node,a1,b1,a2,b2);
8
9 % ----- solve Poisson problem -----
10 u = Poisson(node,elem,bdFlag,pde);
11
12 % ----- error analysis -----
13 ueexact = pde.ueexact;
14 ue = ueexact(node);
15 figure,
16 subplot(1,2,1), showsolution(node,elem,u);
17 zlabel('u');
18 subplot(1,2,2), showsolution(node,elem,ue);
19 zlabel('ue');
20 Eabs = u-ue; % Absolute errors
21 figure, showsolution(node,elem,Eabs); zlim('auto');

```

横纵划分 50 等份的结果如下



9.2 误差指示子的计算

现在考虑误差指示子

$$\eta_K^2 = h_K^2 \|f\|_{0,K}^2 + \sum_{e \in \partial K} h_e \|[\partial_{n_e} u_h]\|_{0,e}^2$$

的计算, 这里右端第一项对应残差, 记为 elemRes; 第二项对应跳量, 记为 elemJump. 注意它们都是 NT 个分量的向量, 每个位置对应一个单元.

9.2.1 残差的计算

右端第一部分是三角形单元上的积分, 有相应的 Gauss 求积公式. iFEM 中提供了三角形上的 Gauss 求积节点与权重, 即 quadpts.m. 我们简单说明一下其用法. 实际上, 那里的权重和节点是针对面积坐标下的参考三角形 \hat{T} 进行的, 积分公式为

$$\iint_{\hat{T}} f(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) d\hat{\sigma} \approx |\hat{T}| \sum_{i=1}^{n_g} w_i f(\lambda_{1,i}, \lambda_{2,i}, \lambda_{3,i}), \quad |\hat{T}| = \frac{1}{2},$$

其中,

$$\begin{cases} x = x_1 \lambda_1 + x_2 \lambda_2 + x_3 \lambda_3 \\ y = y_1 \lambda_1 + y_2 \lambda_2 + y_3 \lambda_3 \end{cases}, \quad \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1, \quad (9.3)$$

注意到

$$\det \left(\frac{\partial(x, y)}{\partial(\lambda_1, \lambda_2)} \right) = 2S,$$

这里 S 是三角形 T 的代数面积, 我们有

$$\int_T F(x, y) d\sigma = 2|T| \int_{\hat{T}} f(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) d\hat{\sigma} = |T| \sum_{i=1}^{n_g} w_i f(\lambda_{1,i}, \lambda_{2,i}, \lambda_{3,i}).$$

因变换前后点处的值不变, 故

$$\int_T F(x, y) d\sigma = |T| \sum_{i=1}^{n_g} w_i F(x_i, y_i).$$

利用 (9.3) 可把参考元上的 Gauss 点 $(\lambda_{1,i}, \lambda_{2,i}, \lambda_{3,i})$ 转化为 T 上的点. 可如下计算 $\|f\|_{0,K}^2$:

```

1 % n: n-th order quadrature rule
2 f = pde.f; n = 3;
3 [lambda, weight] = quadpts(n);
4 NT = size(elem,1); fL2 = zeros(NT,1); % ||f||_{0,K}^2
5 for iel = 1:NT
6     vK = node(elem(iel,:)); % vertices of K
7     area = 0.5*abs(det([[1;1;1],vK]));

```

```

8      xy = lambda*vK;
9      fL2(iel) = area*dot(weight,f(xy).^2);
10 end

```

注 9.1 iFEM 中定义 $h_K = |K|^{1/2}$, 这由 shape regularity 保证. 这样, $h_K^2 = |K|$, 再考虑到积分公式前面的 $|K|$, iFEM 中会出现 $h_K^2 \cdot |K| = |K|^2$, 这就是那里的函数 estimateresidual.m 计算时给出如下语句的原因

```
elemResidual = elemResidual.* (area.^2);
```

本文直接计算直径, 单元面积以及直径在前面的 auxstructure.m 中已经给出. 这样, 可如下计算 elemRes.

```

1 % ----- elemRes -----
2 aux = auxstructure(node, elem);
3 area = aux.area; diameter = aux.diameter;
4 f = pde.f;
5 n = 3; [lambda, weight] = quadpts(n);
6 NT = size(elem, 1); elemRes = zeros(NT, 1);
7 for iel = 1:NT
8     vK = node(elem(iel, :), :); % vertices of K
9     xy = lambda*vK;
10    elemRes(iel) = weight*f(xy).^2;
11 end
12 elemRes = diameter.^2.*area.*elemRes;

```

9.2.2 边界跳量的计算

现在计算第二项

$$\sum_{e \in \partial K} h_e \|[\partial_{n_e} u_h]\|_{0,e}^2,$$

其中 $\partial_{n_e} u_h = \nabla u_h \cdot n_e$.

- 给定左侧单元 K_1 及其边 e , 设右侧单元为 K_2 . 再设 K_1 的边界外法向量为 n_e , 则跳量为

$$[\partial_{n_e} u_h] = [\nabla u_h \cdot n_e] = \nabla u_h \cdot n_e|_{K_1} - \nabla u_h \cdot n_e|_{K_2} = (\nabla u_h|_{K_1} - \nabla u_h|_{K_2}) \cdot n_e.$$

- 注意, 对左右单元跳量是一致的, 从而 $h_e \|[\partial_{n_e} u_h]\|_{0,e}^2$ 也是一致的. 注意到 ∇u_h 是常

数, 我们有

$$\begin{aligned} h_e \|[\partial_{n_e} u_h]\|_{0,e}^2 &= h_e \int_e [\nabla u_h \cdot n_e]^2 ds = h_e \int_e [\nabla u_h \cdot n_e]^2 ds \\ &= h_e^2 [\nabla u_h \cdot n_e]^2 = [\nabla u_h \cdot h_e n_e]^2 \end{aligned}$$

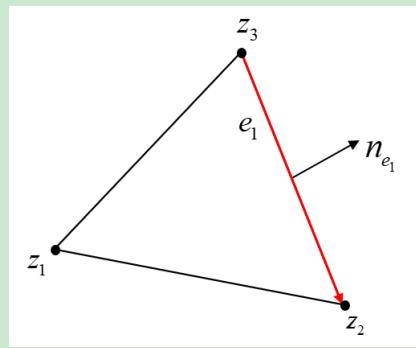
因结果是正的, 我们不必关心 n_e 的方向, 只要取绝对值即可.

- 辅助数据结构中:

- edge 给出了一维边的端点标记, 行索引对应自然序号;
- elem2edge 给出了按单元存储的三条边的自然序号;
- edge2elem, 它给出了边 e 的左右单元.

- 为了避免重复计算, 我们将把所有的一维边 e 的结果计算出来, 然后再给出每个单元的结果.

先考虑 $h_e n_e$ 的计算, 我们按照一维边集合 edge 计算, 结果保存为 nedge.



如图, 三角形 z_i 的对边为 e_i , 相应的外法向量为 n_{e_i} . 可以看到, $h_{e_1} n_{e_1}$ 可由边向量 $e_1 = \overrightarrow{z_3 z_2}$ 逆时针旋转 90° 获得. 易知, 向量 $\alpha = (a, b)$ 旋转 90° 后为 $(-b, a)$. 如下获得所有一维边的 $h_e n_e$ (忽略方向):

```

1 % edge vectors
2 ve = node(edge(:,2),:) - node(edge(:,1),:);
3 % scaled norm vectors he*ne
4 nedge = [-ve(:,2),ve(:,1)]; % stored in rows

```

把 h_e 和 n_e 放在一起, 避免了求边长.

再考虑 ∇u_h 的计算. 注意, 我们已经在初始网格 \mathcal{T}_h 上获得了 u_h (即每个节点处的值, 为了方便, 第 i 个节点的值记为 u_i), 据此可计算 ∇u_h . 设三角形 K 的三个顶点为 z_1, z_2, z_3 , 相应的数值解为 u_1, u_2, u_3 , 则在该单元上有

$$u_h = u_1 \lambda_1 + u_2 \lambda_2 + u_3 \lambda_3,$$

其中, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 是相应的节点基. 于是,

$$\nabla u_h = u_1 \nabla \lambda_1 + u_2 \nabla \lambda_2 + u_3 \nabla \lambda_3,$$

为此需要计算 $\nabla \lambda_i$. 可以证明,

$$\begin{aligned}\frac{\partial \lambda_1}{\partial x} &= \frac{1}{2|K|}(y_2 - y_3), & \frac{\partial \lambda_1}{\partial y} &= \frac{1}{2|K|}(x_3 - x_2), \\ \frac{\partial \lambda_2}{\partial x} &= \frac{1}{2|K|}(y_3 - y_1), & \frac{\partial \lambda_2}{\partial y} &= \frac{1}{2|K|}(x_1 - x_3), \\ \lambda_3 &= 1 - \lambda_1 - \lambda_2.\end{aligned}$$

左右单元的如下计算

```

1 % information of left and right elements
2 k1 = edge2elem(:,1); k2 = edge2elem(:,2);
3 index1 = elem(k1,:); index2 = elem(k2,:);
4 zL1 = node(index1(:,1),:); zR1 = node(index2(:,1),:);
5 zL2 = node(index1(:,2),:); zR2 = node(index2(:,2),:);
6 zL3 = node(index1(:,3),:); zR3 = node(index2(:,3),:);
7
8 % grad of nodal basis functions
9 gradL1 = [zL2(:,2)-zL3(:,2), zL3(:,1)-zL2(:,1)]; % stored in rows
10 gradL2 = [zL3(:,2)-zL1(:,2), zL1(:,1)-zL3(:,1)];
11 gradR1 = [zR2(:,2)-zR3(:,2), zR3(:,1)-zR2(:,1)];
12 gradR2 = [zR3(:,2)-zR1(:,2), zR1(:,1)-zR3(:,1)];
13
14 gradL1 = gradL1./(2*area(k1)); gradR1 = gradR1./(2*area(k2));
15 gradL2 = gradL2./(2*area(k1)); gradR2 = gradR2./(2*area(k2));
16 gradL3 = -(gradL1+gradL2); gradR3 = -(gradR1+gradR2);

```

这里, 梯度向量按行排列坐标, 每行对应一个边.

据此, 可如下计算每条边 e 对应的 $[\nabla u_h]$

```

1 % grad of uh
2 gradLu = u(index1(:,1)).*gradL1 + u(index1(:,2)).*gradL2 + ...
           u(index1(:,3)).*gradL3;
3 gradRu = u(index2(:,1)).*gradR1 + u(index2(:,2)).*gradR2 + ...
           u(index2(:,3)).*gradR3;
4 % jump of gradu
5 Jumpu = gradLu - gradRu;
6 Jumpu(k1==k2,:) = gradLu(k1==k2,:);

```

这里, $k_1 == k_2$ 表示边界上的, 值为本身 (对齐次 Dirichlet 边界部分, 因检验函数在边界上为零, 跳量部分可以去掉, 例如 iFEM. 本文保留).

由此可得到边集合对应的 $h_e \|\partial_{n_e} u_h\|_{0,e}^2$ 的结果, 记为 edgeJump

```
1 % edgeJump
2 edgeJump = dot(Jumpu', nedge') .^ 2; edgeJump = edgeJump';
```

注意, 对两个相同的矩阵, `dot` 的作用时对应列进行运算. 因为我们要把每行对应的向量点乘, 故进行转置再 `dot`.

知道每条边的跳量后, 我们可以利用辅助数据结构 `elem2edge` 获得单元的跳量 $\sum_{e \in \partial K} h_e \|\partial_{n_e} u_h\|_{0,e}^2$.

```
1 % elemJump
2 elemJump = sum(edgeJump(elem2edge), 2);
```

`edgeJump` 是一个列向量, 行索引对应边的自然序号. `elem2edge` 存储单元边的自然序号, 它是 $NT \times 3$ 的矩阵, 第 1 列对应每个单元的第 1 条边, 依此类推. `edgeJump(elem2edge)` 是与 `elem2edge` 相同维数的矩阵, 每个位置给出对应边的跳量. 显然按行求和就得到每个单元的跳量.

综上, 误差指示子为

```
1 % ----- Local error indicator -----
2 eta = (elemRes + elemJump).^(1/2);
```

9.2.3 indicator 函数

误差指示子计算的完整程序如下

```
1 function eta = indicator(node, elem, u, pde)
2
3 % ----- auxstructure -----
4 aux = auxstructure(node, elem);
5 elem2edge = aux.elem2edge;
6 edge = aux.edge;
7 edge2elem = aux.edge2elem;
8 area = aux.area; diameter = aux.diameter;
9
10 % ----- elemRes -----
11 f = pde.f;
12 n = 3; [lambda, weight] = quadpts(n);
```

```

13 NT = size(elem,1); elemRes = zeros(NT,1);
14 for iel = 1:NT
15     vK = node(elem(iel,:)); % vertices of K
16     xy = lambda*vK;
17     elemRes(iel) = dot(weight,f(xy).^2);
18 end
19 elemRes = diameter.^2.*area.*elemRes;
20
21
22 % ----- elemJump -----
23 % edge vectors
24 ve = node(edge(:,2))-node(edge(:,1));
25 % scaled norm vectors he*ne
26 nedge = [-ve(:,2),ve(:,1)]; % stored in rows
27
28 % information of left and right elements
29 k1 = edge2elem(:,1); k2 = edge2elem(:,2);
30 index1 = elem(k1,:); index2 = elem(k2,:);
31 zL1 = node(index1(:,1)); zR1 = node(index2(:,1));
32 zL2 = node(index1(:,2)); zR2 = node(index2(:,2));
33 zL3 = node(index1(:,3)); zR3 = node(index2(:,3));
34
35 % grad of nodal basis functions
36 gradL1 = [zL2(:,2)-zL3(:,2), zL3(:,1)-zL2(:,1)]; % stored in rows
37 gradL2 = [zL3(:,2)-zL1(:,2), zL1(:,1)-zL3(:,1)];
38 gradR1 = [zR2(:,2)-zR3(:,2), zR3(:,1)-zR2(:,1)];
39 gradR2 = [zR3(:,2)-zR1(:,2), zR1(:,1)-zR3(:,1)];
40
41 gradL1 = gradL1./(2*area(k1)); gradR1 = gradR1./(2*area(k2));
42 gradL2 = gradL2./(2*area(k1)); gradR2 = gradR2./(2*area(k2));
43 gradL3 = -(gradL1+gradL2); gradR3 = -(gradR1+gradR2);
44
45 % grad of uh
46 gradLu = u(index1(:,1)).*gradL1 + u(index1(:,2)).*gradL2 + ...
    u(index1(:,3)).*gradL3;
47 gradRu = u(index2(:,1)).*gradR1 + u(index2(:,2)).*gradR2 + ...
    u(index2(:,3)).*gradR3;
48
49 % jump of gradu
50 Jumpu = gradLu-gradRu;

```

```

51 Jumpu(k1==k2,:) = gradLu(k1==k2,:);
52
53 % edgeJump
54 edgeJump = dot(Jumpu',nedge').^2; edgeJump = edgeJump';
55
56 % elemJump
57 elemJump = sum(edgeJump(elem2edge),2);
58
59 % ----- Local error indicator -----
60 eta = (elemRes + elemJump).^(1/2);

```

9.3 标记算法的实现

以下只考虑后两种标记算法, 且假设 η_K 都已获得.

1. The maximum marking strategy

标记所有的单元 K^* , 使得

$$\eta_{K^*} \geq \theta \max_{K \in \mathcal{T}_h} \eta_K, \quad \theta \in (0, 1).$$

程序如下

```

1 NT = size(elem,1); isMark = false(NT,1);
2 isMark(eta>theta*max(eta)) = 1;
3 elemMarked = find(isMark==true);

```

2. The Dörfler bulk strategy

标记所有的单元 $K^* \subset \mathcal{M}_h$, 使得

$$\eta^2(u_h, \mathcal{M}_h) \geq \theta \eta^2, \quad \theta \in (0, 1).$$

将单元按 η_K^2 从大到小排列, 并命名为 K_1, K_2, \dots . 定义

$$s(n) = \sum_{i=1}^n \eta_{K_i}^2,$$

则要找到最小的 n^* 使得,

$$s(n^*) \geq \theta \eta^2 = \theta s(NT).$$

显然 n^* 存在, 且至多为 NT . 我们可转而找最大的 n^* 使得

$$s(n^*) < \theta \eta^2 = \theta s(NT). \tag{9.4}$$

这样, K_1, \dots, K_{n_*} 都是需要标记的单元. 自然 $n_* < NT$, 故 $n^* = n_* + 1$. 为了方便, 我们只标记 K_1, \dots, K_{n_*} . 注意, 若没有满足条件 (9.4) 的 n_* , 则表明 K_1 就是需要的. 程序如下

```

1 [sortedEta,id] = sort(eta.^2,'descend');
2 x = cumsum(sortedEta);
3 isMark(id(x < theta*x(end))) = 1;
4 isMark(id(1)) = 1;
5 elemMarked = find(isMark==true);

```

这里, `cumsum` 是累加函数.

综上, 标记程序如下

CODE 9.1. mark.m

```

1 function elemMarked = mark(elem,eta,theta,method)
2 %Mark mark element.
3
4 NT = size(elem,1); isMark = false(NT,1);
5 if ~exist('method','var'), method = 'Dorfler'; end
6 % default marking is Dofler bulk strategy
7 switch strcmpi(method,'max')
8     case true
9         isMark(eta>theta*max(eta))=1;
10    case false
11        [sortedEta,id] = sort(eta.^2,'descend');
12        x = cumsum(sortedEta);
13        isMark(id(x < theta*x(end))) = 1;
14        isMark(id(1)) = 1;
15    end
16 elemMarked = find(isMark==true);

```

这里, `strcmpi(method, 'max')` 是进行字符串比较且不区分大小写, 因此只要 `method` 是 `max` (不区分大小写), 则选择第一种方法, 其他任何情况都是 Dörfler.

注 9.2 对 maximum marking strategy, θ 越大, 标记的单元越少; Dörfler bulk strategy 恰恰相反.

9.4 Newest-node bisection

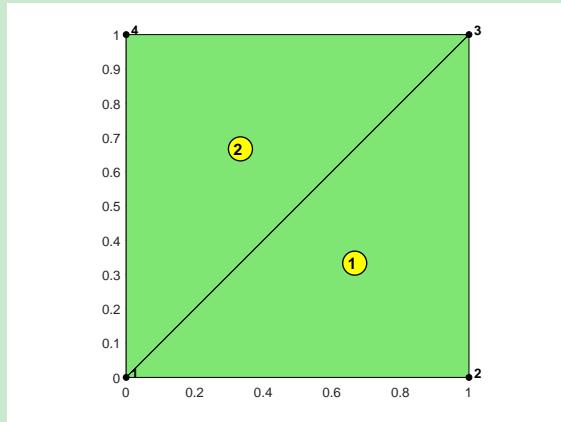
现在介绍一种局部加密算法, 称为 Newest-node bisection, 不妨翻译为最新点二分. 加

密时要注意两点:

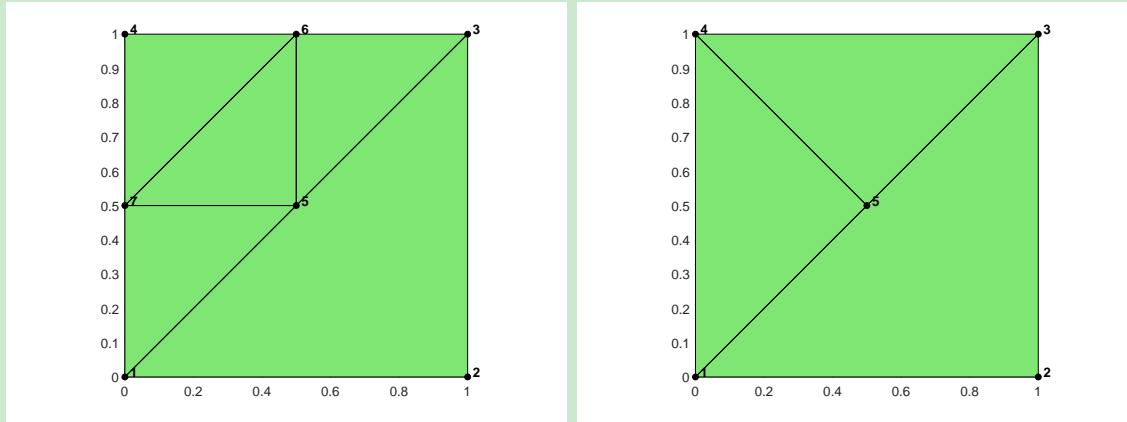
- 保持 shape regularity: 等价于最小角条件;
- 保持协调: 无悬挂点.

9.4.1 局部加密方式

标记好单元后, 我们就要对它们进行局部加密. 以如下的初始网格为例进行说明, 且考虑对单元 2 进行加密.



通常有两种局部加密方式, 如下图所示



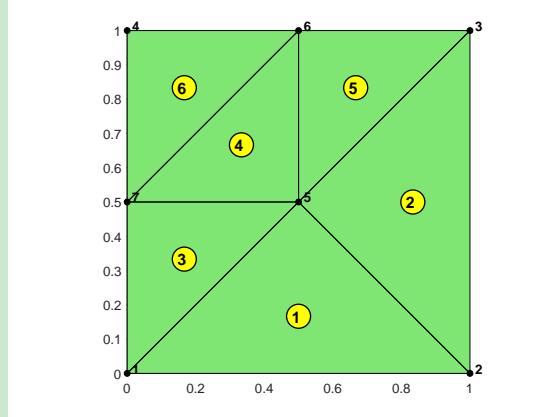
(a) regular refinement

(b) bisection refinement

图 9.1. 两种加密方式

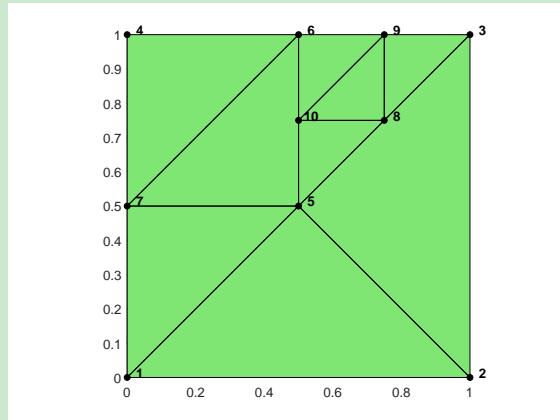
- 正规加密 (regular refinement): 连接三角形各边的中点.
- 二分加密 (bisection refinement): 连接三角形某个顶点与其对边的中点. 称该顶点为三角形的 peak, 对边为 base.

可以看到, 这两种加密均导致非协调剖分, 即含有悬挂点 5. 为了解决悬挂点 5, 对正规加密的图 9.1 (a), 可连接 2-5, 即对单元 ① 进行二分, 如下图

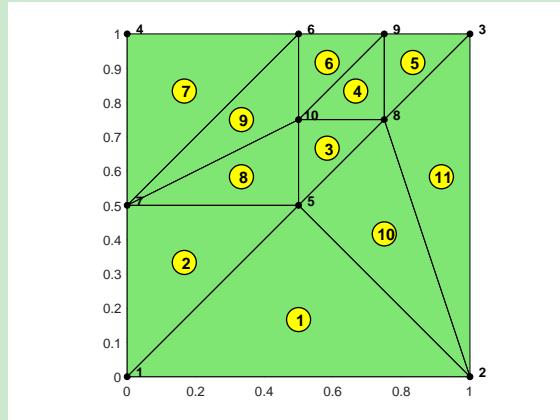


通常称这种处理悬挂点的方法为: the bisection of a triangle as a green refinement. 需要注意的是, 处理正规加密悬挂点的 green refinement 可能导致三角形的退化. 这里退化的意思是剖分不再满足 shape regularity 条件, 因为此时三角形的角可能变得很小.

例如继续对单元 ⑤ 进行正规加密, 得



此时会出现悬挂点 8 和 10, 从而要连接 7-10 和 2-8, 得 green refinement



继续对图中的单元 ⑤ 进行加密的话, 单元 ⑪ 又被二分, 从而三角形的角会越来越小.

注 9.3 正规加密可以说是一种自然加密, 因为它在加密过程中产生的子三角形与大三角形是相似的, 从而自然地继承了 shape regularity. 本文考虑二分加密.

9.4.2 最新点二分的简单说明

为了简明, 我们用一个例子来说明最新点二分.

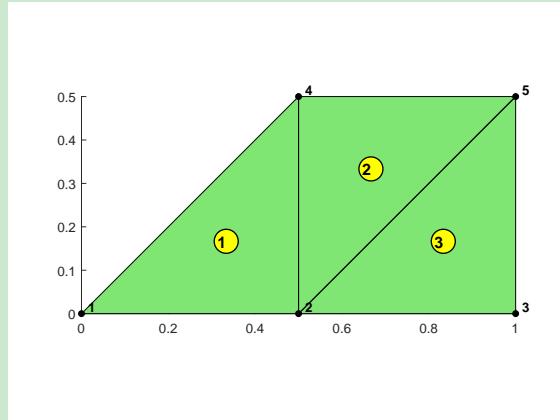


图 9.2. 初始剖分

peak 与 base

如图, 设单元 ① 和 ③ 是标记单元, 即 `elemMarked = [1; 3]`. 对一个三角形, 二分是连接某个顶点与对边的中点, 称该顶点为 peak, 对边为 base.

peak 可以是任意一个, 注意到三角形是按顶点逆时针顺序记录的, 循环置换仍表示同一个三角形, 即 `elem(t, [1 2 3])`, `elem(t, [2 3 1])` 和 `elem(t, [3 1 2])` 都表示单元三角形 t . 为此, 我们规定: 第 1 个顶点为 peak, 即 `elem(t, 1)` 是 peak. 根据数据结构的规定, 第 1 个顶点的对边为第 1 条边, 它就是相应的 base, 即为 `elem(t, [2 3])`. 现在假设, 单元 ① 和 ③ 的 peak 分别为 1, 3.

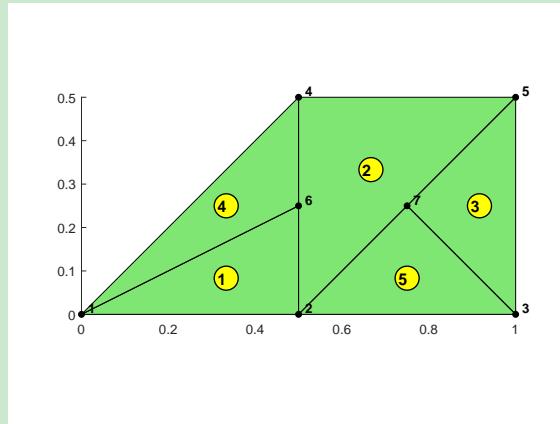
辅助数据结构中, `elem2edge` 按单元存储边的自然序号, 从而 base 可用 `elem2edge(t, 1)` 获得自然序号, 这样, 标记单元的 base 在边集合中的自然序号为

```
base = elem2edge(elemMarked, 1);
```

在一个三角形中 peak 与 base 是一一对应的, 只要记录 base 即可.

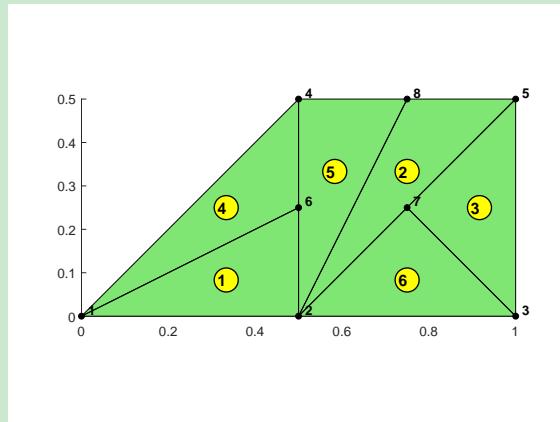
标记单元的扩充

现在开始对标记单元进行二分, 结果为



对每个单元, 规定: 二分的左侧子三角形保留原编号, 右侧子三角形从 $NT+1$ 开始按顺序编号. 为了处理悬挂点, 必须对 base 的相邻单元 ② 进行剖分. 这表明, base 的左右单元都要标记. 而单元与 base 是对应的, 为此只需要记录 base 即可.

最新点二分是把 base 的中点作为子三角形的 peak. 一个重要观察是, 单元 ② 的任一顶点作为 peak 都可解决悬挂点问题. 若 4 是 peak, 则连接 4-7 后悬挂点 7 消失. 根据规定, 7 是子三角形 7-4-2 的 peak. 这样, 单元 1-2-4 与子三角形 7-4-2 有公共的 base, 它们分别连接 peak 和 base, 悬挂点 6 也消失. 若 5 是 peak, 则与上面的情形类似. 若 2 是悬挂点, 连接对边后有



此时又划归到有公共 base 的情形, 即子三角形 8-4-2 与单元 1-2-4 有公共 base 2-4, 而子三角形 8-2-5 与单元 3-5-2 有公共 base 5-2.

注 9.4 当解决悬挂点后, 我们不再进行二分. 这保证了 base 都是原来的 edge, 即没有新的边成为 base. 称其为 “base-edge” 性质.

注 9.5 “base-edge” 性质使得我们可方便地进行二次加密, 以去除悬挂点. 例如, 在上图中 base 只有 2-4, 5-4 和 5-2. 对单元 ①, 按规定, 尽管 6 是 peak, 但其对边不在 base 集合中, 从而不会发生二分. 单元 ⑤ 则不同, 它的 peak 为 8, 对边 4-2 在 base 集合中, 因而会

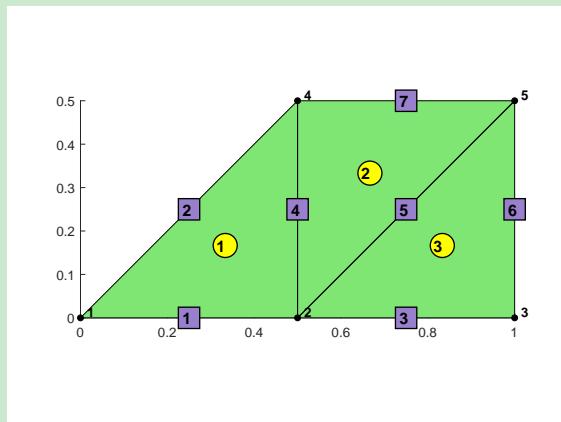
二分. 所以, 在对扩展后的标记三角形进行二分后, 再确认每个子三角形 peak 的对边不在 base 集合中, 就可给出最终的加密网格.

注 9.6 为了方便, 以下称二分标记单元 (base 的左右单元) 为标记二分, 而为了去除悬挂点的二分为协调二分.

9.4.3 标记二分的程序实现

辅助数据 `elem2edge` 按单元存储边的自然序号, 单元的 base 显然为 `elem2edge(:, 1)`. 为了方便使用 `elem2edge`, 下面编程中尽量把与 `edge` 对应.

base 的生成



- base 最多 NE 个, 我们用数组 `isCutEdge` 记录. 给定初始标记单元 `elemMarked ... = [1; 3]`, 则初始的 base 如下获得

```

1  isCutEdge = false(NE, 1);
2  base = elem2edge(elemMarked, 1);
3  isCutEdge(base) = true;

```

其中, `elem2edge(elemMarked, 1)` 给定了标记单元第 1 条边的自然序号, 即标记单元的 base. 例子的 `base = [4; 5]`.

- 接着我们要补充相邻三角形的 base. 为此先找到相邻三角形. 辅助数据结构中给出了 `neighbor` (稀疏矩阵), 其 (i, j) 位置的值表示单元 K_i 的边 e_j 的相邻单元编号, 据此可找到 base 的相邻三角形.

```
refineNeighbor = full(diag(neighbor(elemMarked, base)));
```

注意 `neighbor(elemMarked, base)` 实际上给出的是交错位置矩阵, 取对角线就是需要的. 也可用拉直索引取元素

```
1 cc = NT*(base-1)+elemMarked;
2 refineNeighbor = full(neighbor(cc));
```

结果为 `refineNeighbor=[2;2]`. 可以去除重复的.

- 相邻单元的 base 为

```
baseNeighbor = elem2edge(refineNeighbor,1);
```

例子的 `baseNeighbor=7`. 当然, 其中可能含有已存在的 base, 如下获得新的 base.

```
1 baseNeighbor = elem2edge(refineNeighbor,1);
2 elemNeighborMarked = refineNeighbor(~isCutEdge(baseNeighbor));
3 elemMarked = elemNeighborMarked;
4 base = elem2edge(elemMarked,1); isCutEdge(base) = true;
```

这里, `isCutEdge(baseNeighbor)` 确定相邻单元的 base 是否是旧的 base, 对应真的位置. 这样, `~isCutEdge(baseNeighbor)` 真的位置对应新产生的 base. 后面就是获得新产生的 base 所在的单元, 然后重复之前的标记就可获得新的 base.

- 对新单元重复之前的过程即可消除新单元可能存在的悬挂点 (可以证明, 这个过程在有限步内停止).

综上, base 如下生成

```
1 isCutEdge = false(NE,1);
2 while sum(elemMarked)>0
3     base = elem2edge(elemMarked,1); isCutEdge(base) = true;
4     cc = NT*(base-1)+elemMarked;
5     refineNeighbor = unique(full(neighbor(cc)));
6     baseNeighbor = elem2edge(refineNeighbor,1);
7     elemMarked = refineNeighbor(~isCutEdge(baseNeighbor));
8 end
```

`isCutEdge` 就记录了最终的 base. 例子的 `isCutEdge([4,5,7])=true`.

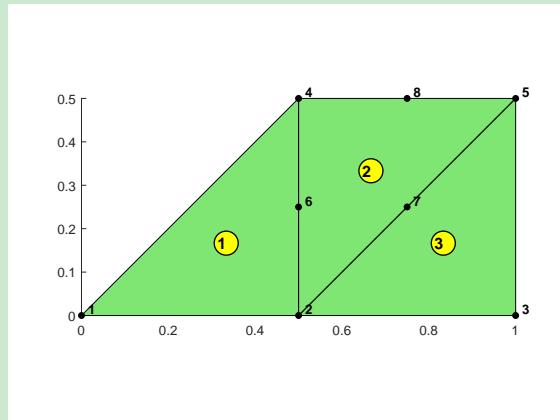
注 9.7 要想实现标记二分, 我们需要确定 base 对应的单元. 回忆一下, `elem2edge(t,1)` 给出的是单元 t 的 base 的自然序号. 于是, 可用如下语句找到单元

```
t = find(isCutEdge(elem2edge(:,1))==true);
```

标记二分的基本数据结构

现在获得标记二分的基本数据结构 node 和 elem.

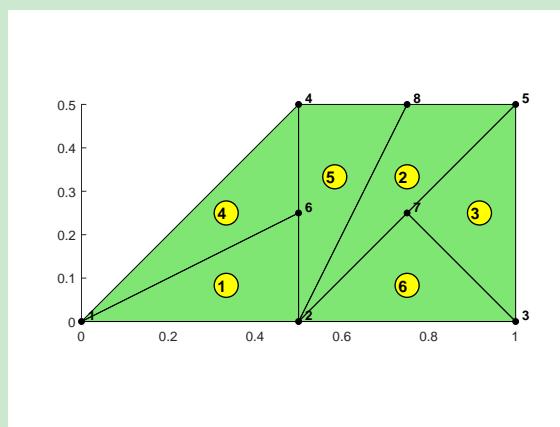
对 node, 只要把标记为 base 的边的中点加入 node 即可.



原先顶点个数为 N, base 的个数为 Nbase=sum(isCutEdge). 于是可如下增加节点

```
1 % ----- Add new nodes -----
2 Nbase = sum(isCutEdge);
3 edgeCutNumber = N + (1:Nbase);
4 edgebase = edge(isCutEdge,:);
5 node(edgeCutNumber,:) = (node(edgebase(:,1),:) + ...
    node(edgebase(:,2),:))/2;
```

接着, 我们要连接 peak 和 base, 获得如下单元分布



```
1 % ----- Refine elements -----
2 edgeCutNumber = zeros(NE,1);
3 edgeCutNumber(isCutEdge) = N + (1:Nbase);
4 t = find(isCutEdge(elem2edge(:,1))==true);
```

```

5 newNT = length(t);
6 if newNT>0
7     L = t; R = NT+(1:newNT);
8     p1 = elem(t,1); p2 = elem(t,2); p3 = elem(t,3);
9     p4 = edgeCutNumber(elem2edge(t,1));
10    elem(L,:) = [p4, p1, p2];
11    elem(R,:) = [p4, p3, p1];
12 end

```

这里把 `edgeCutNumber` 对应 `edge` 给出, 是为了方便与 `elem2edge(t,1)` 对应.

9.4.4 协调二分的程序实现

根据前面的说明, 当子三角形 peak 的对边在 base 集合中, 则该三角形要继续二分, 以去掉悬挂点. 为此, 我们要记录子三角形 peak 的对边, 即三角形的第一条边的自然序号. 显然只要存储在 `elem2edge(:,1)` 中即可, 于是有

```

1 elem2edge(L,1) = elem2edge(t,3);
2 elem2edge(R,1) = elem2edge(t,2);

```

这样, 对新的剖分执行

```
t = find(isCutEdge(elem2edge(:,1))==true);
```

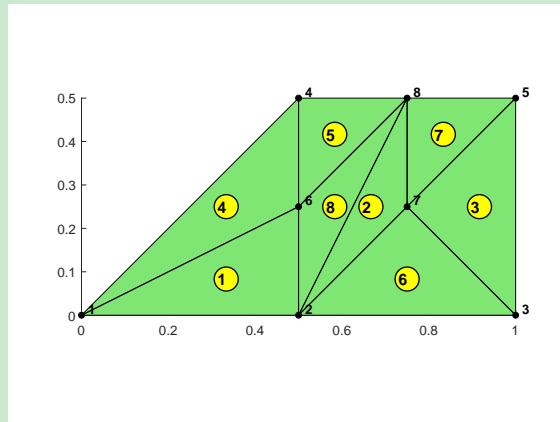
就可找到需要的单元, 从而重复单元的记录即可.

```

1 % ----- Refine elements -----
2 edgeCutNumber = zeros(NE,1);
3 edgeCutNumber(isCutEdge) = N + (1:Nbase);
4 for k = 1:2
5     t = find(isCutEdge(elem2edge(:,1))==true);
6     newNT = length(t);
7     if newNT==0, break; end
8     L = t; R = NT+(1:newNT);
9     p1 = elem(t,1); p2 = elem(t,2); p3 = elem(t,3);
10    p4 = edgeCutNumber(elem2edge(t,1));
11    elem(L,:) = [p4, p1, p2];
12    elem(R,:) = [p4, p3, p1];
13    elem2edge(L,1) = elem2edge(t,3);
14    elem2edge(R,1) = elem2edge(t,2);
15    NT = NT + newNT;
16 end

```

结果如下



9.4.5 Newest-node bisection 程序整理

CODE 9.2. bisect.m

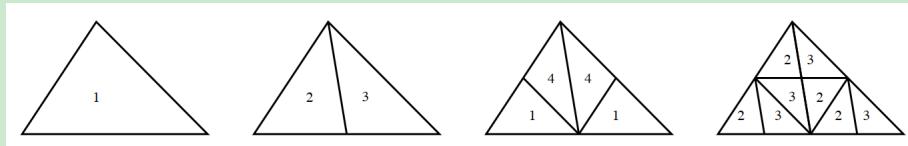
```
1 function [node,elem] = bisect(node,elem,elemMarked)
2
3 % ----- Construct auxiliary data structure -----
4 aux = auxstructure(node,elem);
5 elem2edge = aux.elem2edge; edge = aux.edge; neighbor = aux.neighbor;
6 clear aux;
7 N = size(node,1); NT = size(elem,1); NE = size(edge,1);
8
9 % ----- (peak) base set -----
10 isCutEdge = false(NE,1);
11 while sum(elemMarked)>0
12     base = elem2edge(elemMarked,1); isCutEdge(base) = true;
13     cc = NT*(base-1)+elemMarked;
14     refineNeighbor = unique(full(neighbor(cc)));
15     baseNeighbor = elem2edge(refineNeighbor,1);
16     elemMarked = refineNeighbor(~isCutEdge(baseNeighbor));
17 end
18
19 % ----- Add new nodes -----
20 Nbase = sum(isCutEdge);
21 edgeCutNumber = N+1:N+Nbase;
22 edgebase = edge(isCutEdge,:);
23 node(edgeCutNumber,:) = (node(edgebase(:,1),:) + ...
    node(edgebase(:,2),:))/2;
```

```

24
25 % ----- Refine elements -----
26 edgeCutNumber = zeros(NE,1);
27 edgeCutNumber(isCutEdge) = (N+1:N+Nbase)';
28 for k = 1:2
29     t = find(isCutEdge(elem2edge(:,1))==true);
30     newNT = length(t);
31     if newNT==0, break; end
32     L = t; R = NT+(1:newNT);
33     p1 = elem(t,1); p2 = elem(t,2); p3 = elem(t,3);
34     p4 = edgeCutNumber(elem2edge(t,1));
35     elem(L,:) = [p4, p1, p2];
36     elem(R,:) = [p4, p3, p1];
37     elem2edge(L,1) = elem2edge(t,3);
38     elem2edge(R,1) = elem2edge(t,2);
39     NT = NT + newNT;
40 end

```

注 9.8 Newest-node bisection 只会产生四个相似类, 如下图所示



正因为如此, 该加密满足 shape regularity.

注 9.9 bisection.m 也可用来对网格进行全局加密, 只要把所有单元视为标记单元即可.

9.5 自适应有限元程序

主程序如下

```

1 clc;clear;close all;
2 % ----- Parameters -----
3 maxN = 1e4; theta = 0.4; maxIt = 30;
4 a1 = 0; b1 = 1; a2 = 0; b2 = 1;
5
6 % ----- Initial mesh and set up PDE data -----
7 Nx = 4; Ny = 4; h1 = 1/Nx; h2 = 1/Ny;
8 [node,elem] = squaremesh([a1 b1 a2 b2],h1,h2);

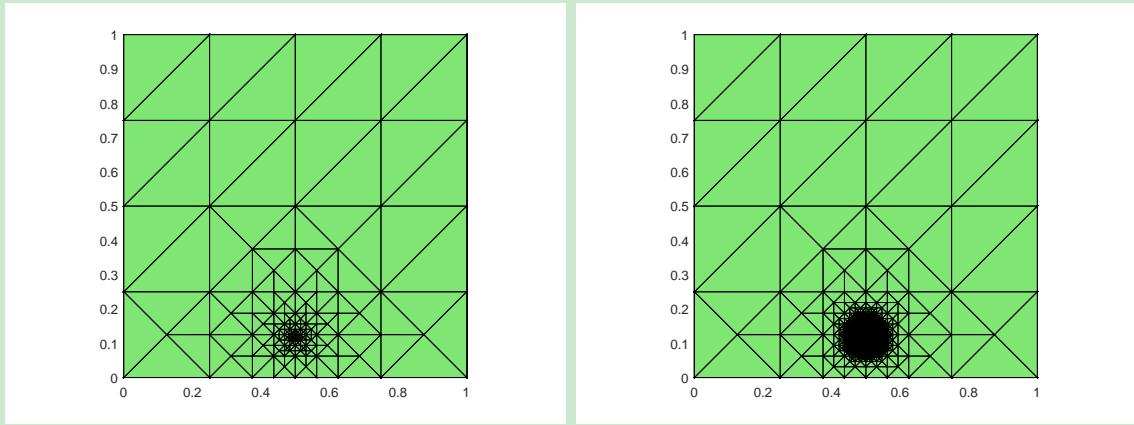
```

```

9 pde = pdedata();
10 % ----- Adaptive Finite Element Method -----
11 for k = 1:maxIt
12     % Step 1: SOLVE
13     bdFlag = setboundary(node,a1,b1,a2,b2);
14     u = Poisson(node,elem,bdFlag,pde);
15     figure(1); showmesh(node,elem);
16
17     % Step 2: ESTIMATE
18     eta = indicator(node,elem,u,pde);
19
20     % Step 3: MARK
21     elemMarked = mark(elem,eta,theta);
22
23     % Step 4: REFINE
24     [node,elem] = bisect(node,elem,elemMarked);
25
26     if (size(node,1)>maxN) || (k==maxIt)
27         bdFlag = setboundary(node,a1,b1,a2,b2);
28         u = Poisson(node,elem,bdFlag,pde);
29         break;
30     end
31
32 end
33
34 % ----- error analysis -----
35 ueexact = pde.ueexact;
36 ue = ueexact(node);
37 figure,
38 subplot(1,2,1), showsolution(node,elem,u);
39 zlabel('u');
40 subplot(1,2,2), showsolution(node,elem,ue);
41 zlabel('ue');
42 Eabs = u-ue; % Absolute errors
43 figure,showsolution(node,elem,Eabs); zlim('auto');

```

网格剖分如下



(a) 迭代 20 次

(b) 迭代 30 次

图 9.3. AFEM 的网格剖分

可以看到, 网格加密基本上在奇点附近.

迭代 30 次的数值解与精确解如下.

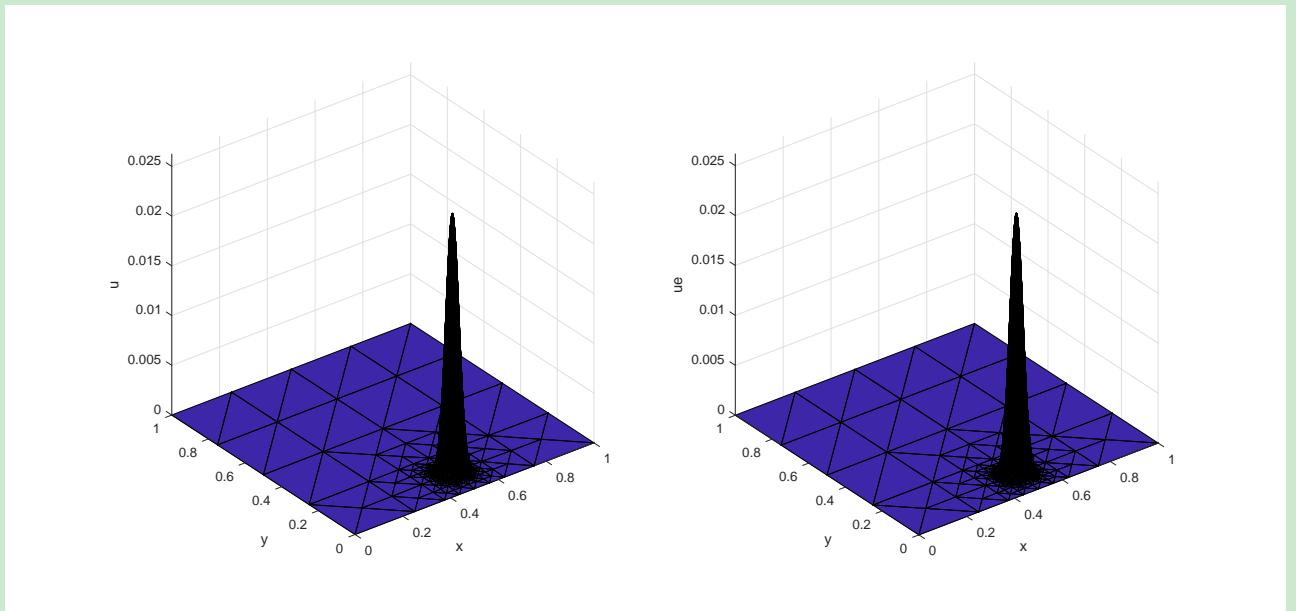


图 9.4. AFEM 的数值解与精确解

可以看到, 计算精度要比同时划分 50 份的高.

注 9.10 对二分法的网格剖分, 我们可使用多重网格法求解代数方程组. 这个方法比较复杂, 需要较长的时间讲清楚, 后面会介绍.

第十章 多重网格法

待整理.

本文考虑迭代法中的多重网格法 (the multigrid methods, MG methods), 且只讨论线性元.

10.1 嵌套有限元

10.1.1 嵌套有限元空间与子空间方程

设 Ω 是多角形区域. \mathcal{T}_1 是区域 Ω 的一个三角剖分, 网格参数为 h_1 . 将剖分进行二分, 如将三角形各边的中点进行连接得加细剖分 \mathcal{T}_2 , 相应的网格参数为 $h_2 = h_1/2$. 依此类推, 可获得一组嵌套的剖分

$$\mathcal{T}_1, \mathcal{T}_2 \cdots, \mathcal{T}_L.$$

对每个三角剖分 \mathcal{T}_l , 定义相应的连续分片线性有限元空间为

$$V_l = \{v_l \in C(\bar{\Omega}) : v_l|_K \in \mathbb{P}_1(K), v_l|_{\partial\Omega} = 0\}.$$

显然

$$V_1 \subset V_2 \subset \cdots \subset V_L =: V_h,$$

注意, 这里的 V_l 实际上是有限元空间 V_h 的粗化.

在 l 层上, 有限元方法为: 找 $u_l \in V_l$ 使得

$$a(u_l, v_l) = (f, v_l), \quad v_l \in V_l. \quad (10.1)$$

在空间 V_l 定义算子

$$A_l : V_l \rightarrow V_l, \quad v_l \mapsto A_l v_l,$$

满足

$$(A_l v_l, w_l) = a(v_l, w_l), \quad v_l, w_l \in V_l.$$

定义 f 在 V_l 上的 L^2 投影 $f_l \in V_l$ 为

$$(f_l, v_l) = (f, v_l), \quad v_l \in V_l,$$

则 (10.1) 可写为

$$A_l u_l = f_l.$$

设 V_l 的节点基为 $N_l = (\varphi_1, \dots, \varphi_{n_l})$, 算子 A_l 在该组基下的矩阵为 \mathbf{A}_l , 即

$$A_l N_l = A_l(\varphi_1, \dots, \varphi_{n_l}) = (\varphi_1, \dots, \varphi_{n_l}) \mathbf{A}_l = N_l \mathbf{A}_l.$$

考虑展开

$$u_l = N_l \mathbf{u}_l, \quad f_l = N_l \mathbf{f}_l,$$

则有

$$\mathbf{A}_l \mathbf{u}_l = \mathbf{f}_l.$$

显然, 上式就是有限元方程组. 在不至误会时, 我们仍用不加粗的符号表示.

注 10.1 在最细的网格空间 V_h 上, 记 $A = A_L$, 即

$$(Av_h, w_h) = a(v_h, w_h), \quad v_h, w_h \in V_h.$$

显然有

$$(A_l v_l, w_l) = a(v_l, w_l) = (Av_l, w_l), \quad v_l, w_l \in V_l. \quad (10.2)$$

10.1.2 延长、限制算子与延长、限制矩阵

设

$$V_1 \subset V_2 \subset \cdots \subset V_L$$

为嵌套空间. 定义自然嵌入

$$I_i : V_i \rightarrow V_{i+1}, \quad v_i \mapsto I_i v_i = v_i,$$

有时候也记为 $I_i = I_i^{i+1}$, 称为延长算子. 定义 L^2 投影

$$Q_i : V_{i+1} \rightarrow V_i, \quad v_{i+1} \mapsto Q_i v_{i+1},$$

满足

$$(Q_i v_{i+1}, w_i) = (v_{i+1}, w_i), \quad v_{i+1} \in V_{i+1}, \quad w_i \in V_i,$$

称其为限制算子, 也记为 $Q_i = I_{i+1}^i$. 后者记号即为转移算子.

可以证明, $Q_i = I_i^\top$, 其中 I_i^\top 表示在内积 (\cdot, \cdot) 下的伴随. 事实上,

$$(Q_i^\top v_i, v) = (v_i, Q_i v) = (v_i, v) = (I_i v_i, v) \quad \forall v_i \in V_i, v \in V_{i+1}.$$

定义 10.1 设 $N_i = (\varphi_1, \dots, \varphi_{n_i})$ 是 V_i 的节点基向量, 由 $I_i \varphi_j \in V_{i+1}$ 知, 存在矩阵 \mathbf{I}_i^{i+1} 使得

$$I_i N_i = N_{i+1} \mathbf{I}_i^{i+1}. \quad (10.3)$$

同理, 由 $Q_i \varphi_j \in V_i$, 存在矩阵 \mathbf{I}_{i+1}^i 使得

$$Q_i N_{i+1} = N_i \mathbf{I}_{i+1}^i. \quad (10.4)$$

称 \mathbf{I}_i^{i+1} 为延长矩阵, \mathbf{I}_{i+1}^i 为限制矩阵.

延长矩阵和限制矩阵用以沟通转移前后的节点值.

先考虑延长矩阵. 给定 $v \in V_i$, 它在 V_i 中的节点值向量记为 \mathbf{v}_i , $I_i v = v$ 在 V_{i+1} 中的节点值向量记为 $\hat{\mathbf{v}}_{i+1}$. 注意 $\mathcal{T}_i \subset \mathcal{T}_{i+1}$, 有 \mathbf{v}_i 是 $\hat{\mathbf{v}}_{i+1}$ 的分量. 而 $\hat{\mathbf{v}}_{i+1}$ 其余的分量是三角形边中点对应的函数值, 由线性插值知, 它们可由三角形顶点值平均得到. 于是, 存在矩阵 \mathbf{I}_i^{i+1} 使得

$$\hat{\mathbf{v}}_{i+1} = \mathbf{I}_i^{i+1} \mathbf{v}_i,$$

这里的矩阵就是前面定义的延长矩阵. 事实上, (10.3) 两边作用于 \mathbf{v}_i 有

$$I_i N_i \mathbf{v}_i = N_{i+1} \mathbf{I}_i^{i+1} \mathbf{v}_i \Rightarrow I_i v = N_{i+1} \mathbf{I}_i^{i+1} \mathbf{v}_i,$$

而 $I_i v = N_{i+1} \hat{\mathbf{v}}_{i+1}$, 即证.

再考虑限制矩阵. 给定 $r \in V_{i+1}$, 它在 V_{i+1} 中的节点值向量记为 \mathbf{r}_{i+1} . 因 $Q_i r \in V_i$, 设它在 V_i 中的节点值向量记为 $\tilde{\mathbf{r}}_i$, 则有

$$\tilde{\mathbf{r}}_i = \mathbf{I}_{i+1}^i \mathbf{r}_{i+1},$$

这只需要把 (10.4) 两边作用于 \mathbf{r}_{i+1} .

可以证明,

$$\mathbf{I}_{i+1}^i = (\mathbf{I}_i^{i+1})^\top.$$

10.1.3 Galerkin 条件

对两层情形, 即 $V_1 \subset V_2$, 视 V_2 为 V , 由 (10.2),

$$(A_1 u_1, v_1) = (A u_1, v_1) = (A I_1 u_1, I_1 v_1) = (I_1^\top A I_1 u_1, v_1), \quad (10.5)$$

这表明

$$A_1 = I_1^\top A I_1 = Q_1 A I_1,$$

即

$$A_1 = I_1^\top A_2 I_1 = Q_1 A_2 I_1,$$

其中, $Q_1 = I_2^1$, $I_1 = I_1^2$. 相应的矩阵形式为

$$\mathbf{A}_1 = \mathbf{I}_2^1 \mathbf{A}_2 \mathbf{I}_1^2.$$

类似有

$$\mathbf{A}_i = \mathbf{I}_{i+1}^i \mathbf{A}_{i+1} \mathbf{I}_i^{j+1}. \quad (10.6)$$

推导 (10.5) 用到双线性形式, 因而称 (10.6) 为 Galerkin 条件, 而获得 \mathbf{A}_i 的方法称为 Galerkin 方法或变分方法.

10.2 MG 的基本思想

迭代法通常有两种构造思路, 一是矩阵分裂, 一是残差或误差校正. MG 基于后者.

10.2.1 残差校正与频率分量

考虑线性算子方程

$$Au = f \quad (10.7)$$

的求解. 设 v 是 u 的一个近似, 则误差为 $e = u - v$, 残差为 $r = f - Av$. 显然误差与残差满足

$$Ae = r, \quad (10.8)$$

这样对近似解通过求解方程 (10.8) 可获得校正 $u = v + e$. 为此给出从 u_k 获得 u_{k+1} 的残差校正格式

残差校正算法

- (1) 形成残差: $r = f - Au_k$;
 - (2) 近似求解残差方程 $Ae = r$ 得校正: $\hat{e} = Br$, 其中, B 是 A^{-1} 的近似;
 - (3) 更新: $u_{k+1} = u_k + \hat{e}$.
-

算子 B 称为迭代子 (iterator) 或光滑子 (smoother). 基于残差校正的方法就是给出 A^{-1} 的一个合理近似 B , 从而可以迭代求解

$$u_{k+1} = u_k + \hat{e} = u_k + Br = u_k + B(f - Au_k).$$

对多重网格法, 我们记 $MG := B$, 从而

$$u_{k+1} = u_k + MG(f - Au_k).$$

考虑问题

$$\begin{cases} -u''(x) = f(x), & x \in (0, 1), \\ u(0) = u_0, & u(1) = u_1. \end{cases}$$

使用步长为 $h = \frac{1}{N+1}$ 的均匀剖分, 易知线性元的刚度矩阵 (`kk(freeNode, freeNode)`) 为

$$A = \frac{1}{h} \begin{bmatrix} 2 & -1 & & \\ -1 & 2 & \ddots & \\ & \ddots & \ddots & -1 \\ & & -1 & 2 \end{bmatrix}_{N \times N},$$

其特征值为

$$\lambda_k = \frac{4}{h} \sin^2 \frac{\theta_k}{2}, \quad k = 1, 2, \dots, N,$$

相应特征向量为

$$\mathbf{p}_k = [\sin(\theta_k), \sin(2\theta_k), \dots, \sin(N\theta_k)]^T, \quad 1 \leq k \leq N,$$

式中 $\theta_k = \frac{k}{N+1}\pi$, $1 \leq k \leq N$. 特征向量满足如下的正交关系

$$\mathbf{p}_i^T \mathbf{p}_j = \frac{1}{2h} \delta_{ij},$$

且任何一个 N 维向量都可由它展开, 自然误差和残差也是如此.

定义 10.2 称特征向量

$$\mathbf{p}_k = [\sin(\theta_k), \sin(2\theta_k), \dots, \sin(N\theta_k)]^T$$

为低频分量, 如果 $1 \leq k < \lceil \frac{N}{2} \rceil$. 剩下的则称为高频分量.

对小的 k , 正弦函数的波数少, 函数图像更加光滑, 所以低频分量也称为光滑分量. 高频分量函数图像摆动较大, 也称为摆动分量.

10.2.2 经典迭代法对频率分量的影响

为了方便, 考虑方程组 $Au = f$, 其中

$$A = \begin{bmatrix} 2 & -1 & & \\ -1 & 2 & \ddots & \\ & \ddots & \ddots & -1 \\ & & -1 & 2 \end{bmatrix}.$$

设 A 分裂为 $A = D - L - U$, 其中 D 是对角线元素给出的对角矩阵, $-L$ 是下三角部分, $-U$ 是上三角部分. Jacobi 迭代可写为

$$Du^{(n+1)} = (L + U)u^{(n)} + f$$

或

$$u^{(n+1)} = D^{-1}(L + U)u^{(n)} + D^{-1}f =: Bu^{(n)} + D^{-1}f,$$

式中,

$$B = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 1 & & \\ 1 & 0 & \ddots & \\ & \ddots & \ddots & 1 \\ & & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

显然精确解 u 满足上面的迭代方程, 定义误差 $e^{(n)} = u^{(n)} - u$, 则有

$$e^{(n+1)} = Be^{(n)} = B^{n+1}e^{(0)}.$$

矩阵 B 的特征向量与 A 相同, 而特征值为

$$\lambda_k = 1 - 2\sin^2 \frac{\theta_k}{2}, \quad \theta_k = \frac{k\pi}{N+1}.$$

设初始误差展开为

$$e^{(0)} = a_1 \mathbf{p}_1 + a_2 \mathbf{p}_2 + \cdots + a_N \mathbf{p}_N,$$

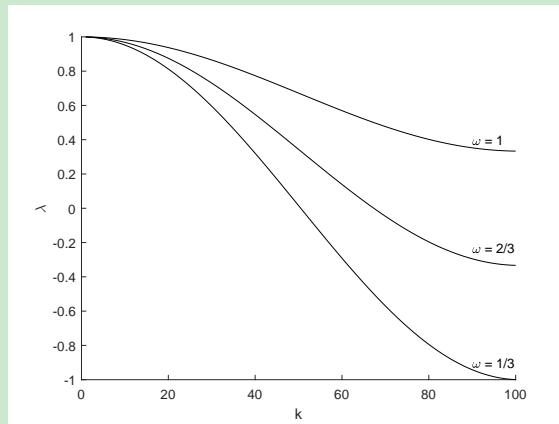
则有

$$e^{(n)} = B^n e^{(0)} = \sum_{i=1}^n a_i \lambda_i^n \mathbf{p}_i.$$

可以看到, 特征值是误差分量的放大系数. 对这里的问题, 显然有 $|\lambda_k| \leq 1$, 从而迭代收敛.

若考虑阻尼 Jacobi 迭代, 设松弛因子为 ω , 则有

$$\lambda_k(\omega) = 1 - 2\omega \sin^2 \frac{\theta_k}{2}, \quad \theta_k = \frac{k\pi}{N+1}.$$



上图给出的是不同阻尼系数特征值随波数 k 的变化. 可以看到, 不论如何选取阻尼系数 ω , 低频分量的衰减系数都不会很小. 这就是为什么经典迭代法在开始衰减较快而后面几乎停滞不动的原因. 事实上, 迭代法最开始高频分量迅速衰减, 而剩下的低频分量衰减并不明显.

注 10.2 残差校正是给定 u_k 获得 u_{k+1} . 这个过程中的迭代初值 $u^{(0)} = u_k$, 残差

$$r = f - Au_k = f - Au^{(0)} = A(u - u^{(0)}) = -Ae^{(0)}.$$

消除误差 $e^{(0)} = u - u_k$ 的频率分量可等价地说消去残差 r 的频率分量.

10.2.3 两网格方法

多重网格法基于如下观察

- 误差分为高频分量和低频分量;
- 经典迭代法可消除误差的高频分量, 对低频分量的抑制作用并不明显;
- 低频部分在粗网格上就可获得较好的近似;
- 细网格上导出的方程条件数更大.

低频或高频与网格剖分有关, 细网格上的一些低频分量在粗网格上是高频分量. MG 的想法就是把细网格上的低频误差视为粗网格上的高频误差, 而对粗网格问题, 我们可再次使用光滑作用. 多重网格法的关键步骤是

- 在细网格上利用通常的迭代法, 如 Richardson 迭代, Gauss-Seidel 迭代进行迭代, 消去残差的高频部分;
- 把细网格上残差的低频部分转移到粗网格上进行残差校正 (视其为粗网格上的高频误差).

根据残差校正方法, 我们是对残差方程进行计算. 一个简单的二层网络如下

算法 3 求解残差方程的两网格算法

1. 前光滑: 在细网格 \mathcal{T}_h 上用某种迭代法求解

$$A_h e_h = r_h,$$

迭代 m_1 次获得近似解 e_h , 从而有残差方程的残差 (仍记为 r_h)

$$r_h \leftarrow r_h - A_h v_h.$$

这里 A_h 对应网格参数 h 的有限元方程.

2. 粗网格校正:

- 将细网格上的残差 r_h 转移到粗网格 \mathcal{T}_{2h} 上, 记为 $I_h^{2h} r_h$.

- 在粗网格上求解残差方程

$$A_{2h} e_{2h} = I_h^{2h} r_h,$$

获得误差 e_{2h} .

- 将粗网格上的误差 e_{2h} 转移到细网格上, 记为 $I_{2h}^h e_{2h}$, 从而获得校正

$$e_h \leftarrow e_h + I_{2h}^h e_{2h}.$$

3. 后光滑: 以 e_h 为初值, 在细网格上用某种迭代法迭代 m_2 次, 获得最终的近似解 e_h .

注 10.3 以下称转移到粗网格上为限制, 而转移到细网格上为延长, 且称开始的残差方程为原方程. 两网格方法的特点是

细网格上: 求解原方程, 即前光滑迭代, 获得残差

↓

粗网格上: 求解残差限制方程, 获得误差

↓

细网格上: 误差延长, 校正原方程的近似解, 并后光滑迭代

注 10.4 两网格方法是直接求解粗网格上的残差限制方程, 它与原方程形式相同, 只不过在粗网格上. 现在可把粗网格视为细网格, 粗网格的下一级粗网格视为粗网格, 而残差限制方程视为原方程, 从而再次使用两网格方法求解. 重复这个思想就获得多重网格法.

注 10.5 不管是限制还是转移, 它们对应的都是同一个有限元函数 (线性元), 这一点在后面程序中再说明. 正因为如此才可以使用残差校正.

10.3 MG 的算法描述

10.3.1 MG 的两网格添加

根据注 10.4, 为了获得多重网格算法, 只需要逐次添加两网格.

- 1 个两网格的过程如下

$$\begin{cases} A_L e_L = r_L \Rightarrow e_L, \quad r_L \leftarrow r_L - A_L e_L \\ A_{L-1} e_{L-1} = Q_{L-1} r_L \Rightarrow e_{L-1}, \\ e_L \Leftarrow e_L + I_L e_{L-1} \end{cases},$$

最后的双箭头包含两层意思: 一是校正, 二是后光滑迭代 (仍用原符号).

- 2 个两网格的过程如下

$$\begin{cases} A_L e_L = r_L \Rightarrow e_L, \quad r_L \leftarrow r_L - A_L e_L \\ A_{L-1} e_{L-1} = Q_{L-1} r_L \left\{ \begin{array}{l} A_{L-1} e_{L-1} = r_{L-1} := Q_{L-1} r_L \Rightarrow e_{L-1}, \quad r_{L-1} \\ A_{L-2} e_{L-2} = Q_{L-2} r_{L-1} \Rightarrow e_{L-2} \\ e_{L-1} \Leftarrow e_{L-1} + I_{L-1} e_{L-2} \end{array} \right. \\ e_L \Leftarrow e_L + I_L e_{L-1} \end{cases},$$

这里视 $Q_{L-1} r_L$ 为 r_{L-1} .

由此可以看到, 在添加两网格的过程中,

- 先逐层递减求残差限制方程 $\begin{cases} Q_{L-1} \\ Q_{L-2}; \\ \vdots \end{cases}$
- 再逐层递增延长误差并后光滑 $\begin{cases} \vdots \\ I_{L-1}. \\ I_L \end{cases}$

具体来说, 多重网格法的计算过程分为如下两步:

算法 4 求解残差方程的多重网格法

Step 1: 计算每层的校正误差: 残差限制与前光滑

- L 层: 给定初值 $e_L^{(0)}$, 迭代求解 $A_L e_L = r_L$, 结果记为 e_L , (新的) 残差仍记为 r_L .
- $L-1$ 层: 以 $e_{L-1}^{(0)} = 0$ 为初值, 迭代求解 $A_{L-1} e_{L-1} = r_{L-1} := Q_{L-1} r_L$, 结果记为 e_{L-1} , 残差为 r_{L-1} .
- $L-2$ 层: 以 $e_{L-2}^{(0)} = 0$ 为初值, 迭代求解 $A_{L-2} e_{L-2} = r_{L-2} := Q_{L-2} r_{L-1}$, 所得结果记为 e_{L-2} , 残差为 r_{L-2} .
- ⋮

Step 2: 延长校正误差与后光滑

⋮

- 对 e_{L-2} 校正: $e_{L-2} \leftarrow e_{L-2} + I_{L-2} e_{L-3}$, 并以校正值为初值, 对 $A_{L-2} e_{L-2} = r_{L-2}$ 做后光滑, 结果仍记为 e_{L-2} .
 - 对 e_{L-1} 校正: $e_{L-1} \leftarrow e_{L-1} + I_{L-1} e_{L-2}$, 并以校正值为初值, 对 $A_{L-1} e_{L-1} = r_{L-1}$ 做后光滑, 结果仍记为 e_{L-1} .
 - 对 e_L 校正: $e_L \leftarrow e_L + I_L e_{L-1}$, 并以校正值为初值, 对 $A_L e_L = r_L$ 做后光滑, 结果记为 e_L , 它就是残差方程的多重网格解.
-

上面的过程可用下图表示

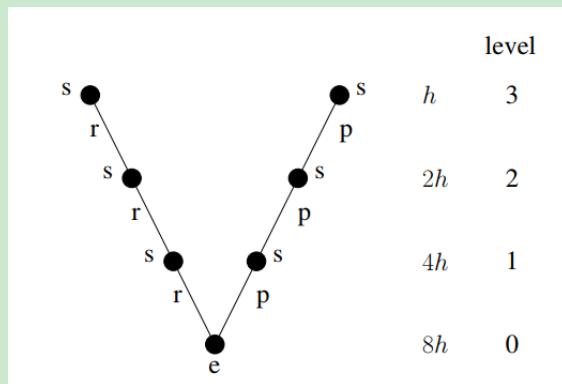


图 10.1. V 循环: s - smoothing, r - restriction, p - prolongation, e - exact solver.

这里规定: 最粗的层直接求解. 因图像形似 V, 称上面的多重网格法为 V 循环多重网格法.

10.3.2 V-循环的伪代码

根据上面的算法, V-循环的伪代码可写为

```

1 function e = Vcycle(r,J)
2 % Solve the residual equation Ae = r by multigrid V-cycle method
3
4 ri = cell(J,1);      % residual in each level
5 ei = cell(J,1);      % correction in each level
6 ri{J} = r;            % initial residual
7
8 % ----- Correction in each level -----
9 for j = J:-1:2
10    % pre-smoothing: one step
11    ei{j} = R{j}*ri{j};
12    % update and restrict residual
13    ri{j-1} = Res{j-1}*(ri{j} - Ai{j}*ei{j});
14 end
15 ei{1} = Ai{1}\ri{1}; % exact solver in the coarsest level
16
17 % ----- prolongation and correction -----
18 for j = 2:J
19    % prolongation and correction
20    ei{j} = ei{j}+Pro{j-1}*ei{j-1};
21    % post-smoothing: one step
22    ei{j} = ei{j} + R{j}'*(ri{j}-Ai{j}*ei{j});
23 end
24 e = ei{J};

```

注 10.6 后光滑中采用 R'_j 即前光滑算子 R_j 的转置, 以保证迭代矩阵 B 是对称的 (这里涉及到迭代格式的对称化, 略). 这样, B 可在预处理共轭梯度 (Preconditioned Conjugate Gradient, PCG) 法中充当预处理子. 正因为如此, 多重网格法本质上是一种预处理方法. 若在前光滑中采用 Gauss-Seidel 迭代, 即 $\mathbf{R}_j = (\mathbf{D}_j + \mathbf{L}_j)^{-1}$, 则后处理中算子转置对应的矩阵为 $(\mathbf{D}_j + \mathbf{U}_j)^{-1}$, 并不是矩阵直接转置. 前者称为 forward Gauss-Seidel, 而后者称为 backward Gauss-Seidel (实际上就是追赶法的两种顺序). 注意, 这里 $\mathbf{A} = \mathbf{D} + \mathbf{L} + \mathbf{U}$.

注 10.7 对 2 个两网格, 在粗网格上, 我们由 e_{L-1} , r_{L-1} 获得新的 e_{L-1} . 这个过程还可以再一次执行. 事实上, 由新的 e_{L-1} 可获得 $r_{L-1} \leftarrow r_{L-1} - A_{L-1}e_{L-1}$, 从而导致需要的 e_{L-1} , r_{L-1} . 这个过程如下

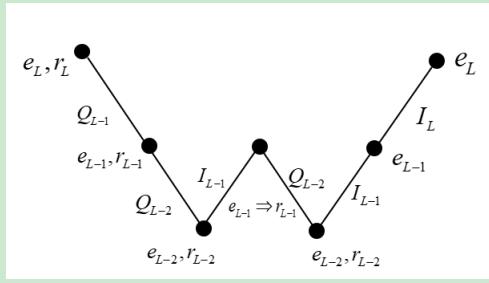


图 10.2. W 循环

该循环形似 W, 称为 W 循环多重网格法. 本文只考虑 V 循环.

10.4 MG 矩阵的获得

暂时考虑一维问题.

10.4.1 延长矩阵

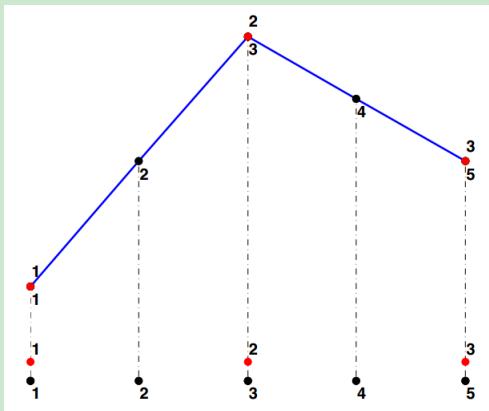


图 10.3. 延长矩阵示意图

如图, 设 3 个红色点对应的粗网格空间为 V_1 , 它是由这些节点值构造的线性有限元空间. 类似地, V_2 是由 5 个黑色点给出的有限元空间. 对 $u_1 \in V_1$, 设节点值向量为 \mathbf{u}_1 . 根据定义, $I_1^2 u_1$ 是 u_1 自然嵌入到 V_2 所得, 它们表示同一个函数, 都是 u_1 . 由 V_1 是线性有限元空间知, 在 V_2 对应的加细节点处, 函数值由 V_1 中的插值获得, 即仍在蓝色直线上. 于是

- 向量 $\mathbf{u}_1 \in \mathbb{R}^3$, $\mathbf{u}_2 = I_1^2 \mathbf{u}_1 \in \mathbb{R}^5$ 对应 V_2 中的同一个函数, 称 \mathbf{u}_2 为延长向量.

对细网格和粗网格的公共节点, 有

$$\mathbf{u}_2(1) = \mathbf{u}_1(1), \quad \mathbf{u}_2(3) = \mathbf{u}_1(2), \quad \mathbf{u}_2(5) = \mathbf{u}_1(3).$$

对细网格上的其他点, 显然延长向量满足

$$\mathbf{u}_2(2) = \frac{\mathbf{u}_1(1) + \mathbf{u}_1(2)}{2}, \quad \mathbf{u}_2(4) = \frac{\mathbf{u}_1(2) + \mathbf{u}_1(3)}{2}.$$

基于以上的式子, 我们有

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_2(1) \\ \mathbf{u}_2(2) \\ \mathbf{u}_2(3) \\ \mathbf{u}_2(4) \\ \mathbf{u}_2(5) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1/2 & 1/2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1/2 & 1/2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1(1) \\ \mathbf{u}_1(2) \\ \mathbf{u}_1(3) \end{bmatrix} \leftrightarrow \mathbf{u}_2[1, 2, 3, 4, 5] = \mathbf{I}_1^2 \mathbf{u}_1[1, 2, 3], \quad (10.9)$$

右侧方括号中是指标的顺序.

我们把细网格上的节点分为两类:

- \mathcal{C} : 粗细网格的公共节点集, 实际上就是粗网格上的节点集;
- \mathcal{F} : 只在细网格上的节点集, 称为细网格上的额外节点集.

为了方便, 以下在程序中规定: 公共部分, 即粗网格部分用 Coarse 标记, 细网格用 Fine 标记, 而额外的细网格部分用 f 标记.

先考虑 \mathcal{F} . 对图 10.3, \mathcal{F} 对应的编号为 $\{2, 4\}$, 节点 2 处的值可由粗网格两侧点处的值获得, 对应粗网格编号 1,2 (所在单元的左右顶点编号). 同理, 4 处对应粗网格左右的编号 2,3. 为此, 我们定义分层基 (hierarchical basis) 矩阵 HB 如下

$$HB = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 2 \\ 4 & 2 & 3 \end{bmatrix},$$

其元素如下

- 第 1 列: 细网格上的额外节点编号 (粗区间中点编号);
- 第 2 列: 额外节点所在粗单元的左顶点编号;
- 第 3 列: 额外节点所在粗单元的右顶点编号.

显然 2,3 列对应第 1 列的插值节点.

对集合 \mathcal{C} , 尽管它们是公共节点, 但在粗细网格上的编号并不相同. 为此, 我们需要定义一个指标映射 Coarse2Fine, 它把粗网格上的编号映射为细网格上的. 图 10.3 中给出的

```
Coarse2Fine = [1 3 5]';
```

可利用 `sparse` 命令生成延长矩阵, 如下

```

1 ii = [Coarse2Fine; HB(:,1); HB(:,1)];
2 jj = [CoarseId; HB(:,2); HB(:,3)];
3 ss = [ones(nCoarse,1); 0.5*ones(nf,1); 0.5*ones(nf,1)];
4 Pro = sparse(ii,jj,ss,nFine,nCoarse);

```

简单解释一下:

- 延长矩阵的行 `ii` 对应细网格, 列 `jj` 对应粗网格.
- `ii`, `jj`, `ss` 元素如下

	<code>ii</code>	<code>jj</code>	<code>ss</code>
公共部分	细网格编号	粗网格编号	值为 1
额外部分	额外细节点编号	插值左端点编号	值为 0.5
额外部分	额外细节点编号	插值右端点编号	值为 0.5

- `nCoarse` 是粗网格节点的个数, `nFine` 是细网格节点的个数, `nf` 是细网格中额外点的个数.

有了延长矩阵 `Pro`, 则限制矩阵 `Res = Pro'`, 从而可得每层的刚度矩阵.

10.4.2 延长矩阵的程序实现

给定初始剖分, 我们可生成 J 个嵌套剖分 (含初始), 但计算中只需要存储最后一个剖分的 `node`, `elem`.

1. 新剖分通过对上一个剖分的单元添加中点获得, 并接着顶点的序号进行编号. 如下生成最后一个剖分

```

1 a = 0; b = 1;
2 NO = 3; x = linspace(a,b,NO)'; % NO: number of initial nodes
3 node = x; elem = [(1:NO-1)', (2:NO)']; % initial mesh
4 for j = 2:J
5
6     N = size(node,1); NT = size(elem,1); Ndof = 2;
7     % add new nodes
8     node(N+1:N+NT) = (node(elem(:,1))+node(elem(:,2)))/2;
9
10    % add new elements
11    % 1 --- 3 --- 2

```

```

12      t = 1:NT; p = zeros(NT,2*Ndof);
13      p(:,1:2) = elem; p(:,3) = (1:NT)' + N;
14      elem(t,:) = [p(t,1), p(t,3)];
15      elem(NT+1:2*NT,:) = [p(t,3), p(t,2)];
16 end

```

区域左右端点的编号就是初始剖分对应的编号, 即左端点编号为 1, 右端点编号为 N0.

2. 对上面的循环, 当前情形下, 分层基矩阵如下获得

```

1 % HB in the current level
2 HB = zeros(NT,3);
3 HB(:,1) = (1:NT)'+N; HB(:,2:3) = elem;

```

这里, elem 是旧的单元信息.

3. 由于我们是在原有剖分节点的基础上继续编号, 故公共节点处的编号不变, 从而有

```

1 % Prolongation matrix
2 Coarse2Fine = (1:N)'; CoarseId = (1:N)';
3 nCoarse = N; nf = nel; nFine = nCoarse+nf;
4 ii = [Coarse2Fine; HB(:,1); HB(:,1)];
5 jj = [CoarseId; HB(:,2); HB(:,3)];
6 ss = [ones(nCoarse,1); 0.5*ones(nf,1); 0.5*ones(nf,1)];
7 Pro{j-1} = sparse(ii,jj,ss,nFine,nCoarse);
8 Res{j-1} = Pro{j-1}'';

```

上面生成了最终的网格剖分、延长矩阵和限制矩阵, 为了方便, 编写为函数 MeshVcycle.m.

```

1 function [node,elem,Pro,Res] = Mesh1DVcycle(node,elem,J)
2
3 if J<=1
4     Pro = []; Res = []; return;
5 end
6
7 Pro = cell(J-1,1); Res = cell(J-1,1);
8 for j = 2:J
9
10    N = size(node,1); NT = size(elem,1); Ndof = 2;
11    % HB in the current level

```

```

12     HB = zeros(NT,3);
13     HB(:,1) = (1:NT)'+N;   HB(:,2:3) = elem;
14
15 % Prolongation matrix
16 Coarse2Fine = (1:N)'; CoarseId = (1:N)';
17 nCoarse = N; nf = NT; nFine = nCoarse+nf;
18 ii = [Coarse2Fine; HB(:,1); HB(:,1)];
19 jj = [CoarseId; HB(:,2); HB(:,3)];
20 ss = [ones(nCoarse,1); 0.5*ones(nf,1); 0.5*ones(nf,1)];
21 Pro{j-1} = sparse(ii,jj,ss,nFine,nCoarse);
22 Res{j-1} = Pro{j-1}';
23
24 % add new nodes
25 node(N+1:N+NT) = (node(elem(:,1))+node(elem(:,2)))/2;
26
27 % add new elements
28 % 1 --- 3 --- 2
29 t = 1:NT; p = zeros(NT,2*Ndof);
30 p(:,1:2) = elem; p(:,3) = (1:NT)' + N;
31 elem(t,:) = [p(t,1), p(t,3)];
32 elem(NT+1:2*NT,:) = [p(t,3), p(t,2)];
33 end

```

10.5 一维问题的 MG 方法

10.5.1 刚度矩阵和载荷向量

在一维问题的有限元方法中, 我们已经给出了说明, 只需要注意此时的区间端点编号为初始网格剖分的, 从而给出边界条件序号.

```

1 % ----- Initial mesh and boundary conditions -----
2 a = 0; b = 1;
3 N0 = 3; % number of initial nodes
4 x = linspace(a,b,N0)'; % uniform
5 %x = [a; sort(rand(N0-2,1)); b]; % random
6 node = x; elem = [(1:N0-1)', (2:N0)']; % initial mesh
7 J = 4; % solve it directly when J≤1
8
9 Neumann = 1; Dirichlet = N0;
10 bdStruct = struct('Dirichlet', Dirichlet, 'Neumann', Neumann);

```

其他部分只要稍加修改即可. 直接法求解只考虑自由节点部分, 即

```
1 u(freeNode) = kk(freeNode,freeNode)\ff(freeNode); % direct
```

MG 方法则要整体考虑, 因为新增的点要用到边界值进行平均. 为此, 要保留 Dirichlet 节点变量, 做法就是直接恒等替换 (并保持对称), 如下

```
1 u = zeros(N,1); u(bdNode) = g_D(node(bdNode));  
2 ff = ff - kk*u;  
3 % ----- Solver -----  
4 A = speye(N); A(freeNode,freeNode) = kk(freeNode,freeNode);  
5 b = u; b(freeNode) = ff(freeNode);
```

这里的 A, b 就是 MG 求解的矩阵和右端.

完整的程序为

```
1 function u = FEM1DVcycle(node,elem,pde,bdStruct,Pro,Res)  
2 %FEM1DVcycle solves the 1-D partial differential equation by Multigrid  
3 % V-cycle method  
4 %  
5 % au''+bu+cu = f, x \in (x0,xL);  
6 % g_N = du(x0), g_D = u(xL);  
7 % or g_D = u(x0), g_N = du(xL);  
8 %  
9 % where, g_N for Neumann boundary conditions and  
10 % g_D for Dirichlet boundary conditions,  
11 % a, b and c are constants.  
12 %  
13 % Copyright (C) Terence YUE Yu.  
14  
15 N = size(node,1); nel = size(elem,1); Ndof = 2;  
16 % ----- Sparse assembling indices -----  
17 nnz = nel*Ndof^2;  
18 ii = zeros(nnz,1); jj = zeros(nnz,1);  
19 id = 0;  
20 for i = 1:Ndof  
21     for j = 1:Ndof  
22         ii(id+1:id+nel) = elem(:,i); % zi  
23         jj(id+1:id+nel) = elem(:,j); % zj  
24         id = id + nel;  
25     end
```

```

26 end
27
28 % ----- Assemble stiffness matrix -----
29 % All element matrices
30 para = pde.para;
31 acoef = para.acoef; bcoef = para.bcoef; ccoef = para.ccoef;
32 x1 = node(elem(:,1)); x2 = node(elem(:,2));
33 h = x2-x1;
34 k11 = -acoef./h+bcoef/2*(-1)+ccoef.*h./6*2;
35 k12 = -acoef./h*(-1)+bcoef/2+ccoef.*h./6;
36 k21 = -acoef./h*(-1)+bcoef/2*(-1)+ccoef.*h./6;
37 k22 = -acoef./h+bcoef/2+ccoef.*h./6*2;
38 K = [k11,k12,k21,k22]; % stored in rows
39 % stiffness matrix
40 kk = sparse(ii,jj,K(:,N,N));
41
42 % ----- Assemble load vector -----
43 xc = (x1+x2)./2;
44 F1 = pde.f(xc).*h./2; F2 = F1; F = [F1,F2];
45 ff = accumarray(elem(:, N), F(:, [N 1]));
46
47 Neumann = bdStruct.Neumann;
48 Dirichlet = bdStruct.Dirichlet;
49 % ----- Neumann boundary conditions -----
50 g_N = pde.g_N;
51 if ~isempty(Neumann)
52     NO = max(Neumann,Dirichlet);
53     bn = zeros(N,1); bn(1) = -1; bn(NO) = 1; % -1: left norm vector
54     bn(Neumann) = bn(Neumann)*g_N(node(Neumann));
55     ff(Neumann) = ff(Neumann) + (-acoef)*bn(Neumann);
56 end
57
58 % ----- Dirichlet boundary conditions -----
59 g_D = pde.g_D;
60 isBdNode = false(N,1); isBdNode(Dirichlet) = true;
61 bdNode = find(isBdNode); freeNode = find(~isBdNode);
62 u = zeros(N,1); u(bdNode) = g_D(node(bdNode));
63 ff = ff - kk*u;
64
65 % ----- Solver -----

```

```

66 %u(freeNode) = kk(freeNode,freeNode)\ff(freeNode); % direct
67 A = speye(N); A(freeNode,freeNode) = kk(freeNode,freeNode);
68 b = u; b(freeNode) = ff(freeNode);
69 u = mgVcycle(A,b,Pro,Res); % multigrid Vcycle

```

注 10.8 后面将给出 V-循环的程序, 要注意它是通用的, 对高维问题也是如此, 只需要获取 A 和 b 即可.

10.5.2 多重网格函数 mgVcycle.m

再次声明一下, 本小节给出的 V-循环函数适用于所有线性元问题.

mgVcycle 函数

前面给出了 V-循环的伪代码, 用到延长矩阵、限制矩阵, 每层的系数矩阵以及光滑迭代. 有了 Pro , Res , 就可生成每层的矩阵 A_i . mgVcycle.m 函数如下

```

1 function u = mgVcycle(A,b,Pro,Res)
2
3 J = length(Pro)+1;
4 Ai = cell(J,1); Ai{J} = A; % matrices in subspaces
5 % note that J-1:-1:1 is empty when J≤1 (solve it directly)
6 for j = J-1:-1:1
7     Ai{j} = Res{j}*Ai{j+1}*Pro{j};
8 end
9
10 tol = 1e-6; tol = tol * norm(b); % Relative tolerance
11 Err = 10; u = zeros(size(b));
12 iter = 0; MaxIt = 20;
13 while Err>tol && iter≤MaxIt
14     r = b-A*u;
15     e = Vcycle1D(A,r,Ai,Pro,Res);
16     u = u+e;
17     Err = norm(e); iter = iter + 1;
18 end

```

Vcycle 函数

现在伪代码可如下具体化

```

1 function e = Vcycle(A,r,Ai,Pro,Res)
2 % Solve the residual equation Ae = r by multigrid V-cycle method
3
4 J = length(Ai); % level length
5
6 % If the problem is small enough, solve it directly
7 if J≤1
8     e = A\r;      return;
9 end
10
11 ri = cell(J,1);           % residual in each level
12 ei = cell(J,1);           % correction in each level
13 ri{J} = r;
14
15 % ----- Correction in each level -----
16 option = 'forward';
17 for j = J:-1:2
18     % % pre-smoothing: one step
19     % ei{j} = R{j}*ri{j};
20     ei{j} = smoother(Ai{j},ri{j},option);
21     % update and restrict residual
22     ri{j-1} = Res{j-1}*(ri{j}-Ai{j}*ei{j});
23 end
24 ei{1} = Ai{1}\ri{1}; % exact solver in the coarsest level
25
26 % ----- prolongation and correction -----
27 option = 'backward';
28 for j = 2:J
29     % prolongation and correction
30     ei{j} = ei{j}+Pro{j-1}*ei{j-1};
31     % % post-smoothing: one step
32     % ei{j} = ei{j} + R{j}'*(ri{j}-Ai{j}*ei{j});
33     rij = ri{j}-Ai{j}*ei{j};
34     ei{j} = ei{j} + smoother(Ai{j},rij,option);
35 end
36 e = ei{J};

```

smoother 函数

前后光滑分别用 forward Gauss-Seidel 和 backward Gauss-Seidel, 程序如下

```
1 function ei = smoother(Ai,ri,option)
2 switch option
3     case 'forward'
4         Ri = tril(Ai); % Forward Gauss-Seidel    R = D+L
5     case 'backward'
6         Ri = triu(Ai); % Backward Gauss-Seidel   R = D+U
7 end
8 ei = Ri\ri;
```

注意, Vcycle.m 和 smoother.m 都放置在 mgVcycle.m 中.

10.5.3 数值结果

主程序如下

```
1 clc;clear;close all
2 % ----- Initial mesh and boundary conditions -----
3 a = 0; b = 1;
4 NO = 3; % number of initial nodes
5 %x = linspace(a,b,NO)'; % uniform
6 x = [a; sort(rand(NO-2,1)); b]; % random
7 node = x; elem = [(1:NO-1)', (2:NO)']; % initial mesh
8 J = 4; % solve it directly when J<=1
9
10 Neumann = 1; Dirichlet = NO;
11 bdStruct = struct('Dirichlet', Dirichlet, 'Neumann', Neumann);
12
13 % ----- mesh and prolongation -----
14 [node,elem,Pro,Res] = MeshVcycle(node,elem,J);
15
16 % ----- PDE -----
17 acoef = -1; bcoef = 0; ccoef = 0;
18 para = struct('acoef', acoef, 'bcoef', bcoef, 'ccoeff', ccoef);
19 pde = pdedata1D(para);
20
21 % ----- FEM1DVcycle -----
22 u = FEM1DVcycle(node,elem,pde,bdStruct,Pro,Res);
23
```

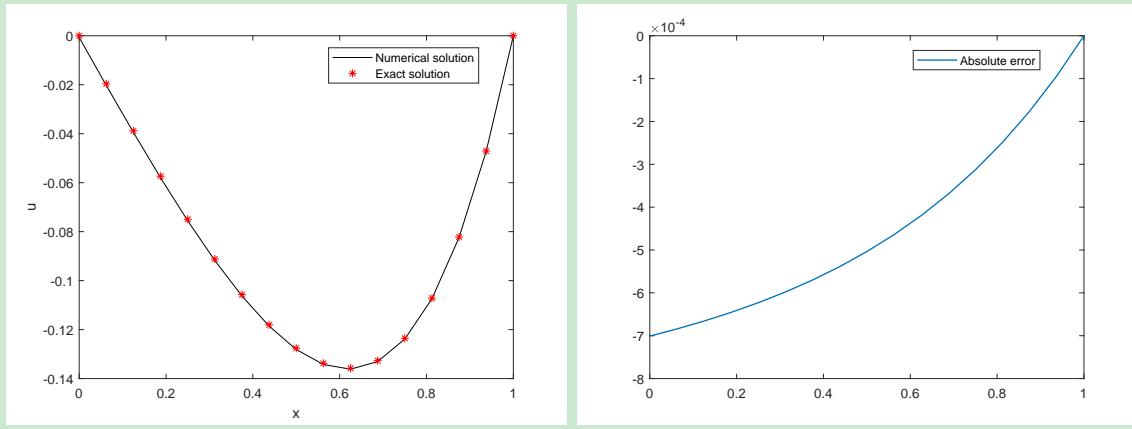
```

24 % ----- error analysis -----
25 [node,id] = sort(node);
26 u = u(id);
27 uexact = pde.uexact(node);
28 figure, plot(node,u,'k',node,uexact,'r*');
29 xlabel('x'); ylabel('u');
30 legend('Numerical solution','Exact solution')
31 Err = u-uexact;
32 figure, plot(node,Err,'linewidth',1); legend('Absolute error');

```

注意, 前面生成的 node 不是按坐标顺序给出的, 直接画图会出现节点交错连接. 为了避免这一点, 我们重新排序, 或者类似二维逐个单元画图(回忆二维 patch).

计算结果如下



(a) 数值解

(b) 绝对误差

图 10.4. 数值解与绝对误差 ($N_0 = 3, J = 4$)

10.6 二维问题的 MG 方法

仍考虑 Poisson 方程, 前面已经详细介绍了对应的线性元方法, 见 CODE. ??.

10.6.1 归结为一维问题

这一节考虑二维问题, 我们将看到, 后面的处理几乎是按照一维问题逐字逐句照抄(对三维问题的线性元也是如此). 我们简单分析一下原因.

- HB, Pro 和 Res 涉及的是剖分顶点以及加细给出的节点. 对二维问题, 可以把所有一维边视为一维问题的一个个“单元”. 粗网格的节点就是“单元”的左右顶点, 而加细节点就是“单元”的中点. 正因为如此, 从边集合角度来看, 二维问题完全归结为一维问题(三维问题显然也是如此).

- 刚度矩阵和载荷向量的处理也与一维问题相同, 只需要保留 Dirichlet 节点变量, 即采用恒等替换法给出 A 和 b , 如下

```

1 % ----- Solver -----
2 %u(freeNode) = kk(freeNode,freeNode)\ff(freeNode); % direct
3 A = speye(N); A(freeNode,freeNode) = kk(freeNode,freeNode);
4 b = u; b(freeNode) = ff(freeNode);
5 u = mgVcycle(A,b,Pro,Res); % multigrid Vcycle

```

这里的 $mgVcycle$ 也不用变.

- 我们唯一要做的就是给出网格加密, 同时生成 Pro 和 Res (视边集合为一维问题的单元).

10.6.2 MG 矩阵的获得

现在, 我们要给定一个初始网格, 然后连接每个三角形边的中点获得加密剖分 (可以是其他加密), 这种加密称为正规加密或一致加密.

正规加密很容易实现. 显然对一维边进行编号就可给出三角形边中点的编号. 在辅助数据结构中, 我们给出了两个与边相关的数据结构, 它们分别是

- $edge$: 一维边的端点标记;
- $elem2edge$: 边的自然序号 (按单元存储).

由此可给出加密. 在循环加密过程中, 我们可给出需要的延长矩阵和限制矩阵, 程序如下

```

1 function [node, elem, Pro, Res] = MeshPoissonVcycle(node, elem, J)
2
3 if J≤1
4     Pro = []; Res = []; return;
5 end
6
7 Pro = cell(J-1,1); Res = cell(J-1,1);
8 for j = 2:J
9     % auxiliary mesh data
10    aux = auxstructure(node, elem);
11    edge = aux.edge; elem2edge = aux.elem2edge;
12    N = size(node, 1); NT = size(elem, 1); NE = size(edge, 1); Ndof = 3;
13
14    % HB in the current level

```

```

15     HB = zeros(NE,3);
16     HB(:,1) = (1:NE)'+N; HB(:,2:3) = edge;
17
18 % Prolongation matrix
19 Coarse2Fine = (1:N)'; CoarseId = (1:N)';
20 nCoarse = N; nf = NE; nFine = nCoarse+nf;
21 ii = [Coarse2Fine; HB(:,1); HB(:,1)];
22 jj = [CoarseId; HB(:,2); HB(:,3)];
23 ss = [ones(nCoarse,1); 0.5*ones(nf,1); 0.5*ones(nf,1)];
24 Pro{j-1} = sparse(ii,jj,ss,nFine,nCoarse);
25 Res{j-1} = Pro{j-1}';
26
27 % add new nodes: middle points of all edges
28 node(N+1:N+NE,:) = (node(edge(:,1),:)+node(edge(:,2),:))/2;
29
30 % add new elements: refine each triangle into four triangles as ...
31 % follows
32 % 3
33 % + \
34 % 5- 4
35 % | \ | \
36 % 1- 6- 2
37 t = 1:NT; p = zeros(NT,6);
38 p(:,1:3) = elem;
39 p(:,4:6) = elem2edge + N;
40 elem(t,:) = [p(t,1), p(t,6), p(t,5)];
41 elem(NT+1:2*NT,:) = [p(t,6), p(t,2), p(t,4)];
42 elem(2*NT+1:3*NT,:) = [p(t,5), p(t,4), p(t,3)];
43 elem(3*NT+1:4*NT,:) = [p(t,4), p(t,5), p(t,6)];
44 end

```

上面的过程可以说是直白的, 不再解释.

10.6.3 数值结果

主程序如下

CODE 10.1. main_PoissonVcycle.m

```

1 clc;clear;close all;
2 % ----- Initial mesh -----

```

```

3 a1 = 0; b1 = 1; a2 = 0; b2 = 1;
4 Nx = 5; Ny = 5; h1 = (b1-a1)/Nx; h2 = (b2-a2)/Ny;
5 [node,elem] = squaremesh([a1 b1 a2 b2],h1,h2);
6 J = 3; % solve it directly when J≤1
7
8 % ----- Final mesh, prolongation matrices and boundary conditions ...
-----
9 [node,elem,Pro,Res] = MeshPoissonVcycle(node,elem,J);
10
11 bdNeumann = 'abs(x-1)<1e-4'; % string for Neumann
12 bdStruct = setboundary(node,elem,bdNeumann);
13
14 % ----- PDE data -----
15 % pde = struct('uexact',@uexact, 'f',@f, 'g_N',@g_N, 'g_D',@g_D);
16 pde = Poissondata();
17
18 % ----- Poisson -----
19 u = PoissonVcycle(node,elem,pde,bdStruct,Pro,Res);
20
21 % ----- error analysis -----
22 uexact = pde.uexact;
23 ue = uexact(node);
24 figure,
25 subplot(1,2,1), showsolution(node,elem,u);
26 subplot(1,2,2), showsolution(node,elem,ue);
27 Eabs = u-ue; % Absolute errors
28 figure, showsolution(node,elem,Eabs); zlim('auto');
29 format shorte
30 Err = norm(u-ue)/norm(ue)

```

数值解与精确解如下

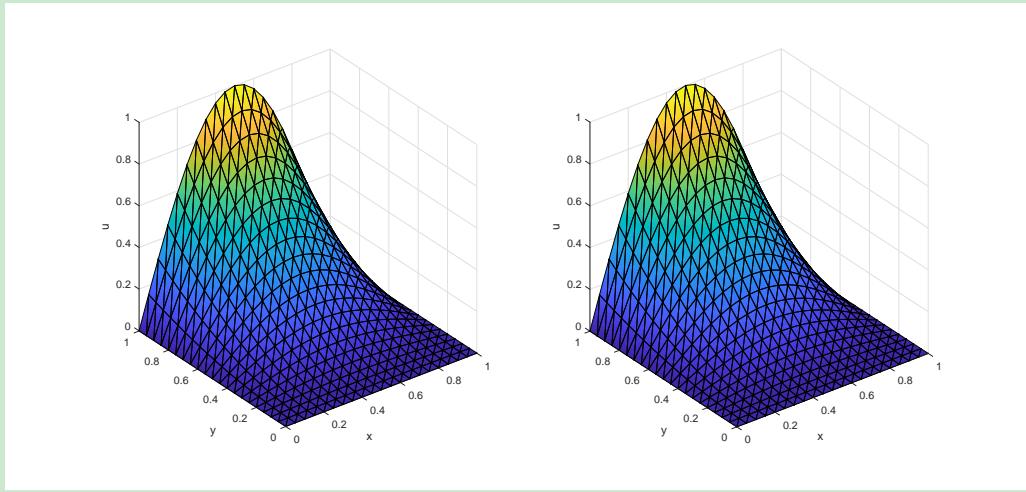


图 10.5. Poisson 方程 V-循环多重网格法的数值结果

10.6.4 基于变分形式的编程

程序编写说明

现在我们编写基于变分形式的程序, 函数文件为

```
1 [u,w] = biharmonicMixedFEM_variational(Th,pde)
```

刚度矩阵如下获得

```
1 node = Th.node; bdStruct = Th.bdStruct;
2 N = size(node,1);
3 % ----- Stiffness matrix -----
4 % matrix A
5 cf = @(p) 1 + 0*p(:,1);
6 Coef = {cf}; Trial = {'u.val'}; Test = {'v.val'};
7 A = -int2d(Th,Coef,Trial,Test);
8 % matrix B
9 cf = @(p) 1 + 0*p(:,1);
10 Coef = {cf}; Trial = {'u.grad'}; Test = {'v.grad'};
11 B = int2d(Th,Coef,Trial,Test);
12 % kk
13 O = zeros(size(B));
14 kk = [A, B; B', O];
```

载荷向量如下

```
1 % ----- Load vector -----
2 Coef = pde.f; Test = 'v.val';
```

```

3 ff = int2d(Th,Coef,[],Test);
4 0 = zeros(size(ff));
5 ff = [0; ff];

```

注 10.9 这个程序还得优化, 因为 int2d.m 产生的是装配好的矩阵, 对较细的网格, 矩阵拼接可能 out of memory. 注意原来的程序是最后统一装配的.

Neumann 边界条件对应第一行方程, 如下获得.

```

1 % ----- Neumann boundary conditions -----
2 Th.elem1D = bdStruct.elemD;
3 %Coef = @(p) pde.Du(p)*n;
4 Coef = getMat1d(pde.Du,Th);
5 ff(1:N) = ff(1:N) + int1d(Th,Coef,[],Test);

```

Dirichlet 边界条件需要单独处理, 如下

```

1 % ----- Dirichlet boundary conditions -----
2 eD = bdStruct.eD; g_D = pde.g_D;
3 id = eD+N;
4 isBdDof = false(2*N,1); isBdDof(id) = true;
5 bdDof = isBdDof; freeDof = (~isBdDof);
6 pD = node(eD,:);
7 U = zeros(2*N,1); U(bdDof) = g_D(pD);
8 ff = ff - kk*U;

```

这样, 我们有

```

1 % ----- Solver -----
2 U(freeDof) = kk(freeDof,freeDof)\ff(freeDof);
3 u = U(N+1:end); w = U(1:N);

```

程序整理

完整的函数文件如下

```

1 function [u,w] = biharmonicMixedFEM_variational(Th,pde)
2 % BiharmonicMixedFEM solves the biharmonic equation
3 %
4 %      Laplace^2 u = f;    [a1,b1] * [a2,b2]
5 %      u = g_D;
6 %      Dn u = g_N.

```

```

7 %
8 % by writing in a mixed form
9 %
10 %      - Laplace u = w
11 %      - Laplace w = f
12 %
13 % Unlike the conforming or nonconforming FEMs, the second boundary ...
14 % condition
15 % is a Neumann boundary condition in this case.
16 node = Th.node; bdStruct = Th.bdStruct;
17 N = size(node,1);
18
19 % ----- Stiffness matrix -----
20 % matrix A
21 cf = @(p) 1 + 0*p(:,1);
22 Coef = {cf}; Trial = {'u.val'}; Test = {'v.val'};
23 A = -int2d(Th,Coef,Trial,Test);
24 % matrix B
25 cf = @(p) 1 + 0*p(:,1);
26 Coef = {cf}; Trial = {'u.grad'}; Test = {'v.grad'};
27 B = int2d(Th,Coef,Trial,Test);
28 % kk
29 O = zeros(size(B));
30 kk = [A, B; B', O];
31
32 % ----- Load vector -----
33 Coef = pde.f; Test = 'v.val';
34 ff = int2d(Th,Coef,[],Test);
35 O = zeros(size(ff));
36 ff = [O; ff];
37
38 % ----- Neumann boundary conditions -----
39 Th.elem1D = bdStruct.elemD;
40 %Coef = @(p) pde.Du(p)*n;
41 Coef = getMat1d(pde.Du,Th);
42 ff(1:N) = ff(1:N) + int1d(Th,Coef,[],Test);
43
44 % ----- Dirichlet boundary conditions -----
45 eD = bdStruct.eD; g_D = pde.g_D;

```

```

46 id = eD+N;
47 isBdDof = false(2*N,1); isBdDof(id) = true;
48 bdDof = isBdDof; freeDof = (~isBdDof);
49 pD = node(eD,:);
50 U = zeros(2*N,1); U(bdDof) = g_D(pD);
51 ff = ff - kk*U;
52
53 % ----- Solver -----
54 U(freeDof) = kk(freeDof,freeDof)\ff(freeDof);
55 u = U(N+1:end); w = U(1:N);

```

主程序

误差阶可通过如下程序获得.

```

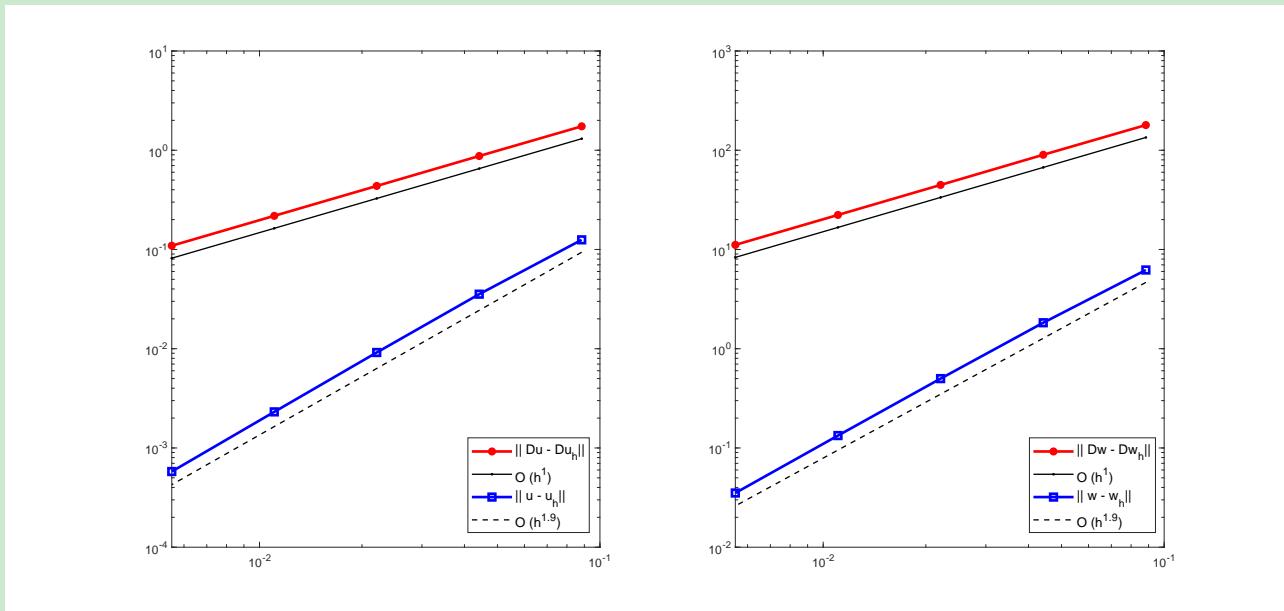
1 clc;clear;close all;
2 % ----- Mesh -----
3 a1 = 0; b1 = 1; a2 = 0; b2 = 1;
4 Nx = 4; Ny = 4; h1 = (b1-a1)/Nx; h2 = (b2-a2)/Ny;
5 [node,elem] = squaremesh([a1 b1 a2 b2],h1,h2);
6
7 % ----- PDE data -----
8 pde = biharmonicdata;
9
10 % ----- biharmonicMixedFEM -----
11 maxIt = 5;
12 N = zeros(maxIt,1); h = zeros(maxIt,1);
13 erruL2 = zeros(maxIt,1); erruH1 = zeros(maxIt,1);
14 errwL2 = zeros(maxIt,1); errwH1 = zeros(maxIt,1);
15 for k = 1:maxIt
16     [node,elem] = uniformrefine(node,elem);
17     bdStruct = setboundary(node,elem);
18     Th.node = node; Th.elem = elem; Th.bdStruct = bdStruct;
19     [u,w] = biharmonicMixedFEM_variational(Th,pde);
20     NT = size(elem,1);
21     h(k) = 1/sqrt(NT);
22     erruL2(k) = getL2error(node,elem,u,pde.uexact);
23     erruH1(k) = getH1error(node,elem,u,pde.Du);
24     errwL2(k) = getL2error(node,elem,w,pde.wexact);
25     errwH1(k) = getH1error(node,elem,w,pde.Dw);

```

```

26 end
27
28 % ----- Plot convergence rates -----
29 figure;
30 subplot(1,2,1);
31 showrateh(h, erruL2, erruH1);
32 subplot(1,2,2)
33 showrateh(h, errwL2, errwH1, '|| w - w_h || ', '|| Dw - Dw_h || ');

```



参考文献

- [1] K. Feng and Z.C. Shi. Mathematical Theory of Elastic Structures [M]. Springer-Verlag, 1996.